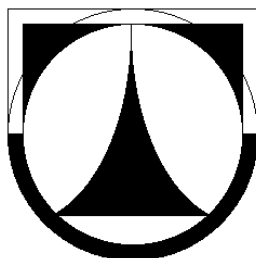


**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**FAKULTA TEXTILNÍ**

**KATEDRA NETKANÝCH TEXTILIÍ**



**LINEÁRNÍ ÚTVARY POKRYTÉ NANOVLÁKNY**

**LINEAR STRUCTURES COVERED BY NANOFIBRES**

Autor diplomové práce: Filip Sanetrník

Vedoucí diplomové práce: Prof. RNDr. Oldřich Jirsák CSc.

***Rozsah práce:***

stran	obrázků	tabulek	pramenů
48	20	7	17

## P r o h l á š e n í

Prohlašuji, že předložená bakalářská práce je původní a zpracoval jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušil autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

Souhlasím s umístěním bakalářské práce v Univerzitní knihovně TUL.

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

V Liberci, dne 24. května 2013

.....

Podpis

## Poděkování

Děkuji panu Prof. RNDr. Oldřichu Jirsákovi CSc. za velmi cenné rady, pomoc a připomínky, které mi pomohli při vypracování této bakalářské práce. Dále děkuji Ing. Jiřímu Chaloupkovi Ph.D. za pomoc při realizaci experimentální části práce. V neposlední řadě děkuji své rodině za trpělivost a podporu.

**Anotace:**

Tato bakalářská práce se věnuje textilním lineárním útvarům obsahujícím nanovlákná. V teoretické části studuje a kriticky hodnotí dosavadní výsledky vývoje těchto útvarů, popisuje technologii a zařízení k výrobě těchto útvarů a definuje nezávislé a závislé proměnné procesu jejich výroby. V praktické části popisuje sérii experimentů zaměřených na studium vztahů mezi parametry ochranné bandáže nanovláknenného povlaku a plněním její funkce.

**Klíčová slova:**

nanovlákná, elektrostatické zvlákňování, nit', tření, ohybová tuhost

**Annotation:**

The bachelor thesis is focused on the preparation and testing of the yarns containing the nanofibre component. In the theoretical part the thesis studies and evaluates current outputs of the research and development of the nanofibrous yarns. The technology and the apparatus for the preparation of the nanofibrous yarns are described and the independent and related variables are defined. In the experimental part of the thesis the set of the experiments focused on the study of relations between the protective filament parameters and its functionality are described.

**Key words:**

nanofibers, electrospinning, yarn, friction, flexural rigidity

## OBSAH

<b>1. Úvod</b>	<b>8</b>
<b>2. Teoretická část</b>	<b>9</b>
2.1. Elektrostatické zvlákňování	9
2.1.1. Jehlové elektrostatické zvlákňování	10
2.1.2. Bezjehlové elektrostatické zvlákňování	10
2.2. Formy nanovláknenných materiálů	11
2.3. Lineární útvary obsahující nanovlákná	12
2.3.1. Útvary tvořené pouze z nanovláken	12
2.3.2. Útvary pokryté nanovláknem	13
2.4. Technologie výroby nanovláknem povrstvaných nití	13
2.4.1. Technologie využívající nepravého zákrutu	13
2.4.2. Technologie podle PV 2009-797	14
2.5. Zhodnocení teoretických poznatků a cíle BP	19
<b>3. Experimentální část</b>	<b>19</b>
3.1. Cíl	19
3.2. Plán experimentu	20
3.3. Experiment	20
3.3.1. Výroba poloproduktu	20
3.3.2. Výroba finálního lineárního útvaru	22
3.3.3. Návrh a popis metody stanovení míry poškození nanovláknenného povlaku třením	25
3.3.4. Stanovení míry poškození nanovláknenného povlaku třením	27
3.3.5. Teoretické stanovení plochy nanovláknenného povlaku zakrytého bandáží	31
3.3.6. Stanovení změny ohybové tuhosti vlivem ochranné bandáže	49
<b>4. Diskuze výsledků</b>	<b>42</b>
<b>5. Závěr</b>	<b>44</b>
<b>6. Seznam použité literatury</b>	<b>47</b>

## Seznam symbolů

$a$	strana kosočtverce daného křížením ovíjecích nití
$d$	průměr ovíjecí nití
$g$	délková hmotnost
$l$	délka jednoho ovinu
$l_v$	délka vysunutí
$n$	otáčky
$o$	počet ovinů
$q$	parametr vmáčknutí
$s$	výška stoupání šroubovice
$\bar{s}$	šířka průmětu ovíjecí nití
$v$	rychlost
$w$	hloubka vmáčknutí
$C$	ohybová délka
$D$	průměr jádra s nanovlákněným povlakem
$G$	ohybová tuhost
$L$	délka ovíjecí nití na jádře jednotkové délky
$L_2$	délka dvou ovíjecích nití na jádře jednotkové délky
$S_c$	celková plocha nanovlákněného povlaku překrytá ovíjecími nitmi
$S_k$	plocha jednoho křížení ovíjecích nití
$S_{kc}$	celková plocha křížení ovíjecích nití
$S_{ov}$	plocha jádra překrytá bandáží
$S_{ov}[\%]$	plocha jádra překrytá bandáží vyjádřená v %
$S_v$	plocha válcového jádra
$\alpha$	úhel stoupání šroubovice
$\beta$	úhel mezi sousedícími stranami kosočtverce

## 1. Úvod

Práce se zabývá lineárními útvary obsahujícími nanovlákná. Navazuje na rozsáhlý technologický a aplikační výzkum v oblasti nanovláken probíhající zejména od počátku 21. století. V rámci tohoto výzkumu bylo dosaženo zejména:

- rozsáhlých experimentálních a teoretických poznatků o mechanismech tvorby nanovláken elektrostatickým zvlákňováním
- vývoje laboratorních a průmyslově využitelných technik přípravy, případně výroby nanovláken
- vývoje širokého spektra aplikací nanovláken.

Nanovlákná připravovaná elektrostatickým zvlákňováním se ukládají na podkladových materiálech nejčastěji ve formě plošných útvarů. Typicky se vyrábějí plošné útvary o nízkých plošných hmotnostech ( $0,05 - 10 \text{ g/m}^2$ ). Ty se vedle unikátních užitných vlastností vyznačují i omezenými mechanickými vlastnostmi a nízkou odolností vůči tření. Proto se často nanovláknenné vrstvy kombinují s jinými plošnými materiály.

Jednou z cest, vedoucích k podstatnému zvýšení mechanických vlastností funkčních útvarů s nanovláknem je vytvoření lineárních útvarů s nanovláknem, a jejich zpracování známými textilními technikami. V případě vytvoření tenkých nanovláknenných vrstev na povrchu pevných a levných nití by tak vznikly cenově dostupné a volitelně pevné plošné textilní útvary s nanovláknem. Vývojem postupů výroby takových lineárních útvarů se autor předložené BP několik let zabývá a některé výsledky jsou v BP obsaženy.

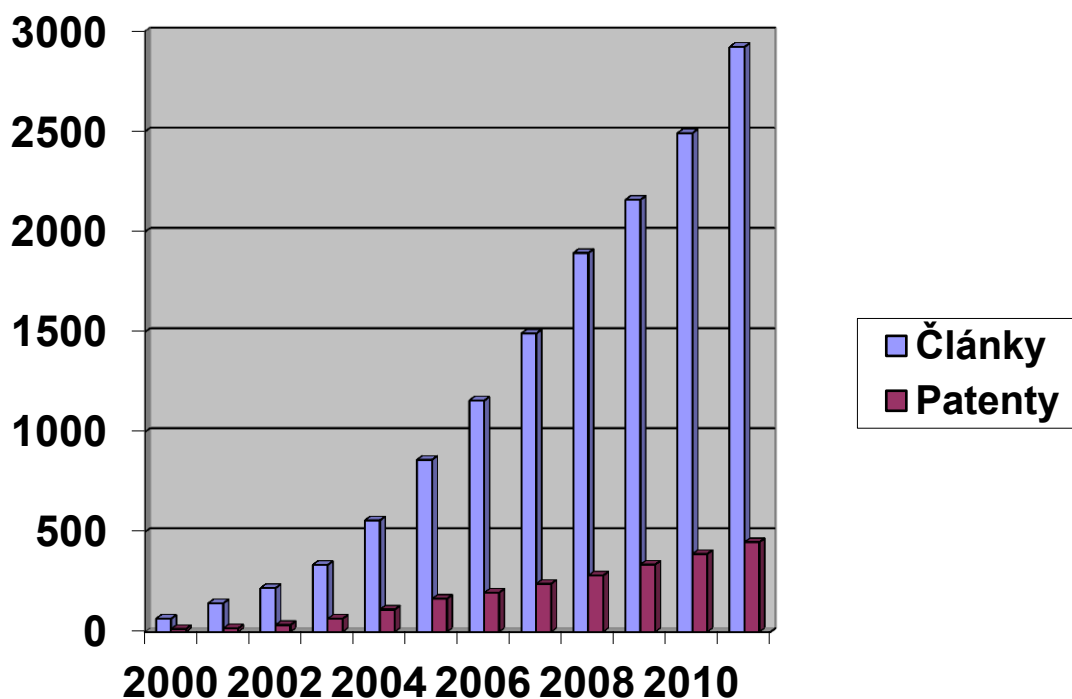
## 2. Teoretická část

### 2. 1. Elektrostatické zvlákňování

Elektrostatické zvlákňování představuje v současné době nejvíce využívanou metodu přípravy nanovláken z organických polymerů a anorganických materiálů. Teorie i technika těchto postupů je popsána ve stovkách publikací, zveřejněných zejména od počátku 21. století i v několika knižních publikacích [ 1-3 ].

Počet vědeckých prací a patentů zaměřených na nanovláknna v jednotlivých letech tohoto století je na obrázku 1. Údaje byly získány z databází vědecké literatury [www.isiknowledge.com](http://www.isiknowledge.com) a Evropského patentového úřadu [www.worlwide.espacenet.com](http://www.worlwide.espacenet.com).

Není úkolem této práce pojednávat detailně o obecných otázkách elektrostatického zvlákňování. Budou uvedeny jen základní principy technologie.



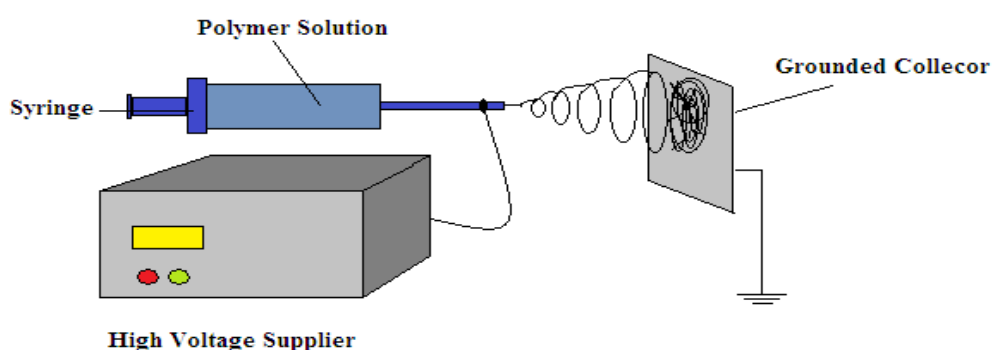
*Obr. 1: Počet vědeckých publikací a patentů zaměřených na nanovláknna v letech 2000-2011.*



### 2.1.1. Jehlové elektrostatické zvlákňování

Stovky laboratoří po celém světě jsou vybaveny zařízením pro jehlové elektrostatické zvlákňování, ať vlastní výroby nebo profesionálním. Toto zařízení umožňuje připravovat vzorky nanovláknenných vrstev v množství několika desetin gramu za hodinu. To je postačující k základnímu výzkumu vlastností nanovláken.

Laboratorní typ jehlového elektrostatického zvlákňovacího zařízení je schematicky znázorněn na obrázku 2. Jehlového zvlákňování využívají i některá provozní zařízení. Ta pak obsahují stovky jehel.

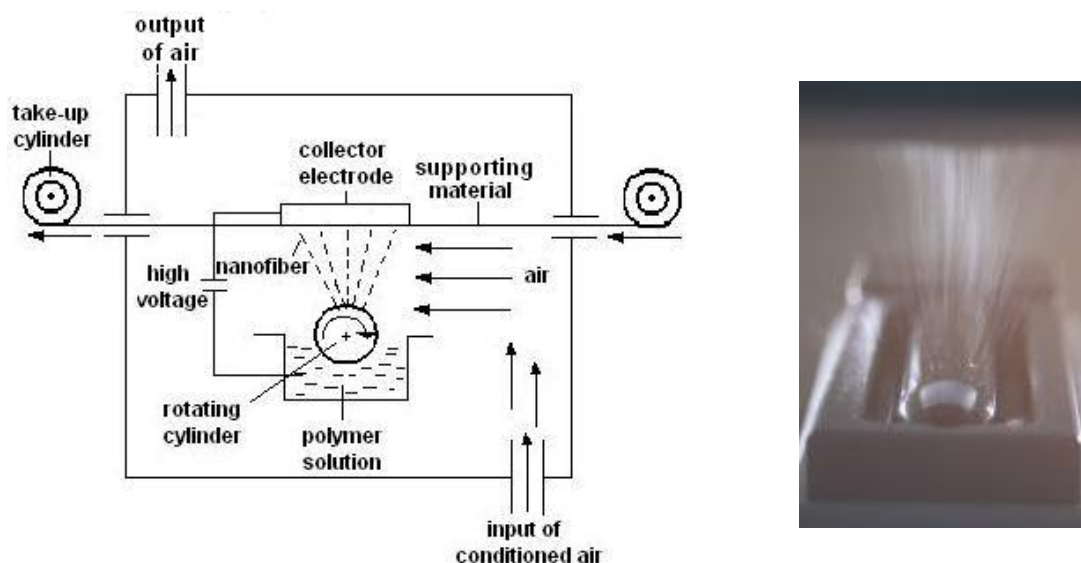


*Obr. 2: Schéma laboratorního jehlového zvlákňovacího zařízení.*

### 2.1.2. Bezjehlové elektrostatické zvlákňování

Podstatou bezjehlového zvlákňování je vytváření nanovláken z povrchu roztoku nebo taveniny polymeru. Vlivem vysokého elektrického napětí se na hladině vytvářejí Taylorovy kužely, z nichž vychází proud roztoku nebo taveniny nazývaný tryska (jet). Ta se pak vlivem odpuzivých elektrostatických sil mění v postupně se zpevňující nanovlákná. Nanovlákná jsou pak v elektrickém poli transportována k opačně nabitě, častěji uzemněné elektrodě, kde se ukládají ve formě nanovláknenné vrstvy.

První zařízení pro bezjehlové zvlákňování chráněné patentem [4] pracuje se zvlákňovací elektrodou ve formě hladkého nebo různě formovaného válce (viz. Obr. 3).



*Obr. 3: Bezjehlové zvlákňování s válcovou elektrodou – schema a fotografie.*

Kromě válcové elektrody byly navrženy a studovány jiné typy elektrod, například rotující strunová, statická struna natíraná roztokem polymeru, disková, drátová ve tvaru šroubovice [5, 6] a jiné. Různé elektrody se liší intenzitou elektrického pole, zvlákňovací schopností, zvlákňovacím výkonem a/nebo kvalitou vyrobených nanovláken.

## 2. 2. Formy nanovláknenných materiálů

Nanovláknenné materiály nabývají různých forem v závislosti na typu a tvaru povrchu, na němž jsou vytvářeny. Nejobvyklejší formou je dvojrozměrná nanovláknenná vrstva tvořená na rovinném kolektoru nebo plošném pohybujícím se útvaru jako je papír nebo textilie. Profilovaný, případně pohybující se kolektor dovoluje vznik různě tvarovaných trojrozměrných útvarů. Kolektor tvaru drátu nebo trubičky rotující kolem podélné osy vede k tvorbě nanovláknenných vrstev tvaru trubice. Kolektory tvořené soustavou drátů umožňují vznik nanovláknenných vrstev s částečně anizotropickým uspořádáním.

Předmětem studia této práce je povrstvování lineárních útvarů typu přízí resp. nití.

## 2. 3. Lineární útvary obsahující nanovlákná

K myšlence vytváření lineárních nanovláknenných útvarů vedla potřeba řešení některých nevyhovujících vlastností dvourozměrných vrstev a to zejména nízkých odolností vůči namáhání tahem a třením. Jejich nízké pevnosti nesouvisejí s hodnotami měrných pevností – ty jsou poměrně vysoké – ale zejména s malými plošnými hmotnostmi, typicky v rozmezí  $0.05 - 10 \text{ g/m}^2$ . Nízká odolnost nanovláknenných vrstev vůči tření je dána extrémně malými průměry nanovláken a je nutno ji řešit zakrytím jejich povrchu.

Dosažení vysokých mechanických pevností textilních materiálů obsahujících nanovlákná se řeší zpracováním lineárních útvarů textilními technikami, zejména tkaním a pletením. Přitom se uvažuje v zásadě s dvěma typy lineárních útvarů:

- lineární útvary tvořené pouze z nanovláken, které vykazují relativně vysokou tahovou pevnost díky vysokému stupni orientace nanovláken ve směru osy
- lineární útvary sestávající z jádra, kterým je obecně jakákoliv nit daná typem materiálu, délkovou hmotností, pevností, cenou a dalšími volitelnými vlastnostmi a z pláště tvořeného nanovláknem ve volitelném množství.

### 2.3.1. Útvary tvořené pouze z nanovláken

Orientované příze z nanovláken byly spoluvyvinuty autorem v roce 2005 a prezentovány v rámci expozice firmy Elmarco na výstavě netkaných textilií Index 2005 v Ženevě.

Postup výroby byl následující: Nanovláknenná vrstva byla vytvářena ve formě proužku o šíři asi 5 cm na pohybujícím se nekonečném kovovém pásu, přičemž nalétávající nanovlákná byla zčásti orientována laminárním proudem vzduchu. Páska byla snímána z tohoto pásu v místě jeho ohybu, intenzivně stáčena vzduchovou tryskou kolem podélné osy a takto vzniklá příze navíjena.

Cena takto vyráběné příze by byla vzhledem k malé výrobní rychlosti – 2 m/min- velmi vysoká, proto nebyl způsob výroby chráněn.

Prakticky stejný postup, včetně stáčení vzduchovou tryskou, byl později patentován korejskými autory [7,8].

Jiný postup je chráněn korejským patentem [9]. Je založen na řezání nanovláknenné vrstvy na pásy a stáčením pásků kolem osy.

Zajímavý postup kontinuální přípravy nanopřízí popisují Ali a spoluautoři [10]. Kolektorem nanovláken je zvonovitý útvar rotující kolem své osy, přičemž nanovlákná nalétávají na jeho hranu. Z kolektoru je kontinuálně odváděna příze opatřená zákrutem daným jeho rotací.

Všechny doposud známé postupy výroby přízí obsahujících pouze nanovlákná se vyznačují nízkými výrobními rychlostmi a z toho vyplývající cenou neúnosně vysokou pro jakékoliv průmyslové aplikace. Dalším jejich znakem je, že obsahují značnou část nanovláken v blízkosti středu příze. Tím je velmi omezena možnost využití specifických vlastností této části nanovláken. Z těchto důvodů se zájem obrátil ke kompozitním lineárním útvarům obsahujícím levné jádro poskytující potřebné mechanické vlastnosti a minimální množství nanovláken k zabezpečení specifických vlastností.

### **2.3.2. Útvary pokryté nanovlákný**

Postup výroby kompozitních lineárních útvarů obtáčením nosné niti stužkou z nanovláken je popsán v patentu [11]. Přímé nanášení nanovláken na probíhající nit je předmětem patentu [12].

Poznatky z vývoje kompozitních lineárních útvarů na TUL v Liberci a výsledky chráněné v [13, 14] jsou podrobněji popsány v následující kapitole 2.4.

## **2. 4. Technologie výroby nanovlákný povrstvených nití**

Na TUL byly vyvíjeny následující dvě technologie s cílem dosáhnout ekonomicky přijatelných výrobků pro využití v různých oblastech.

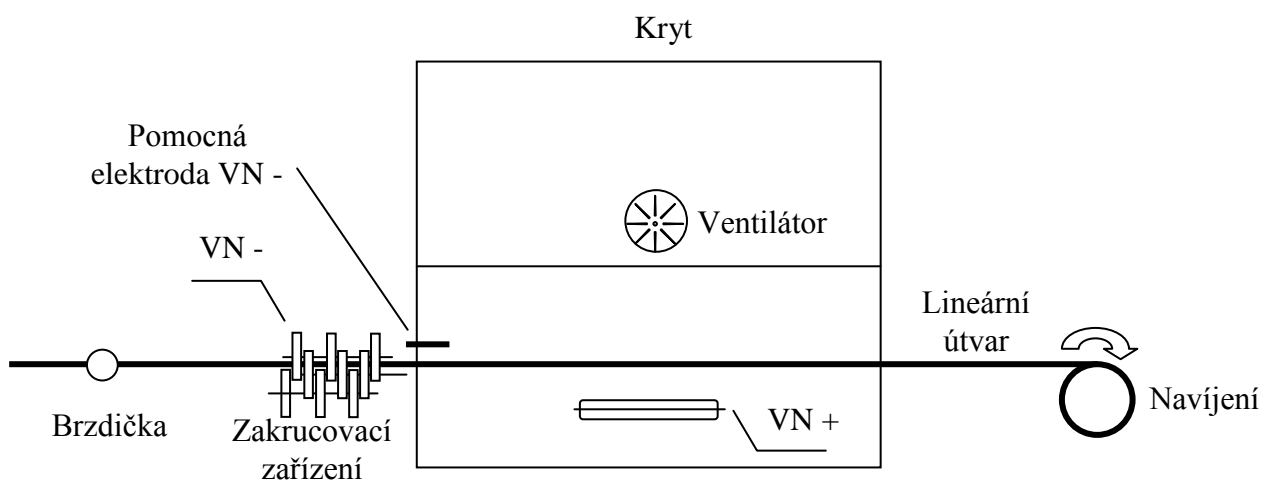
### **2.4.1. Technologie využívající nepravého zákrutu**

Postup chráněný v [13] je blíže popsán v [15].

Postup spočívá v elektrostatickém zvlákňování roztoku polymeru, přičemž kolektorem nanovláken je nosná nit probíhající zvlákňovacím prostorem a současně rotující kolem své podélné osy (viz. Obr. 4). Rotace niti kolem její osy se dosahuje zkrucovacím zařízením běžně využívaným k udělování nepravého zákrutu při tvarování nití, které působí na nit před jejím vstupem do zvlákňovacího prostoru. Zařízení může pracovat na principu

pinolky nebo na frikčním principu. Úsek niti, nacházející se v daném okamžiku ve zvlákňovacím prostoru, musí být uzemněný. To předpokládá nit elektricky vodivou vlivem speciální úpravy nebo dočasně zvodivělou naneseným zvodivovacím roztokem.

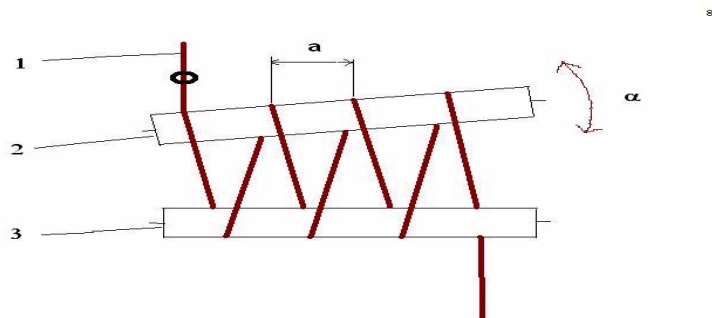
Výzkumné úsilí věnované tomuto způsobu výroby kompozitního lineárního útvaru nedospělo k průmyslově využitelnému výsledku z několika důvodů. Hlavním byla vysoká intenzita „elektrického větru“, sestávajícího z nabitých částic a pohybujícího se směrem od protielektrody k letícím nanovláknům. Ta jsou elektricky přepólována ještě před dopadem na protielektrodu a odchýlena od ní. Pozdější pokusy snížení intenzity elektrického pole v oblasti kolektoru paralelním vedením několika rotujících nití vedly k příliš komplikovanému zařízení a vzniku dalších problémů procesu.



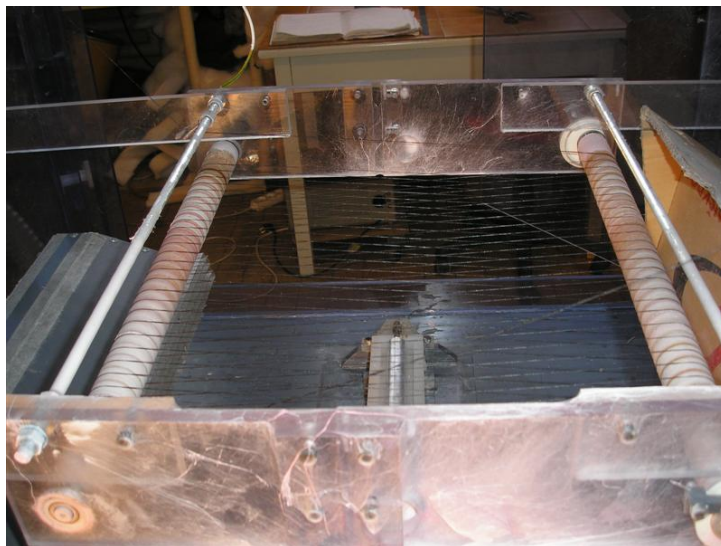
**Obr. 4:** Vedení nosné příze ve stavu nepravého zákrutu zvlákňovacím zařízením.

#### 2.4.2. Technologie podle PV 2009-797

Postup je založen na poznatku z předešlé kapitoly, že kolektorem nemůže být jediný úsek niti probíhající zvlákňovacím zařízením, ale je nutno zajistit soustavu v podstatě paralelních nití v nastavitelných vzájemných roztečích. Postup je chráněn patentovým spisem [14] a blíže popsán v [16].



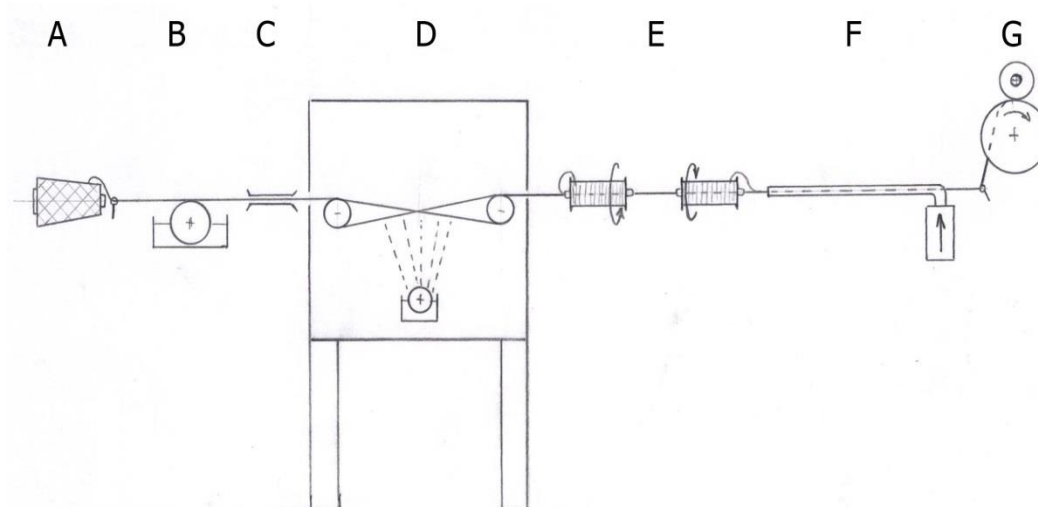
**Obr. 5:** Vedení nosné niti dvojicí válců s mimoběžnými osami – schéma.



**Obr. 6:** Vedení nosné niti dvojicí válců s mimoběžnými osami – fotografie laboratorního provedení.

Na obrázku 5 a 6 je znázorněno schéma a fotografie kolektoru pro pokrývání niti nanovlákný. Vzdálenosti jednotlivých úseků niti lze měnit pomocí plynulého nastavení mimoběžnosti vodících válců.

Schéma kontinuální výrobní linky pro výrobu nanovlákný pokryté niti je na obrázku 7.



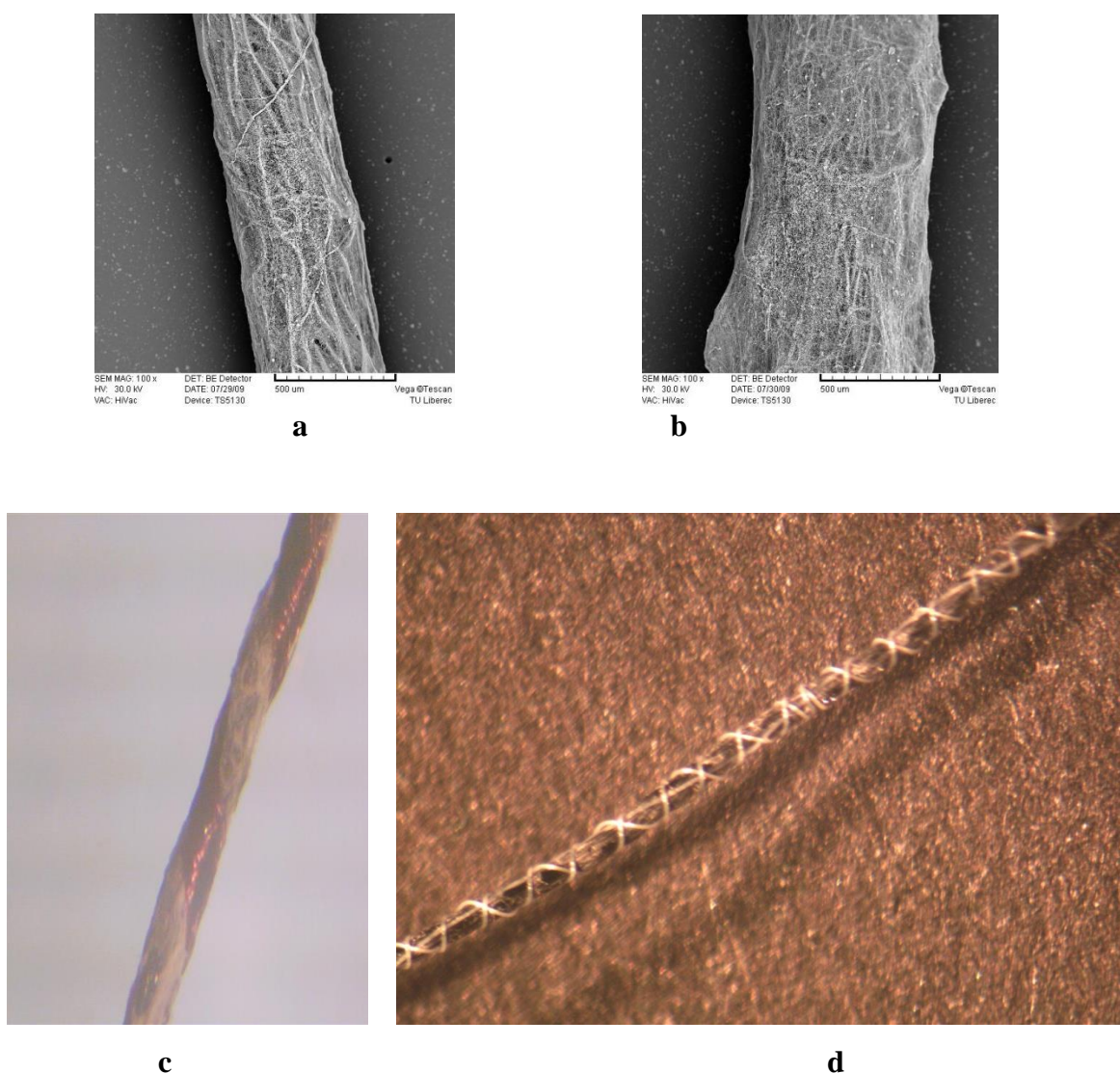
**Obr. 7:** Schéma zařízení pro výrobu nanovláknny pokrytých přízí: A-odvíjení nosné nití, B-nanášení zvodivovacího roztoku, C-roztírání zvodivovacího roztoku, D-vedení nití zvlákňovacím prostorem, E-obtáčecí zařízení, F-tepelná úprava kompozitní nití, G-navíjení.

Ve schématu na obrázku 7 jsou znázorněny jednotlivé části zařízení a to:

- odvíjení nosné nití a nastavení jejího pnutí brzdíčkou
- nanášení zvodivovacího roztoku válcem s nastavitelnou obvodovou rychlostí
- zvlákňování na nit vedenou způsobem znázorněným na obrázku 5 a 6
- obtáčení poloproduktu (nosné jádro+nanovláknenný povlak) jednou, ale častěji dvěma ochrannými nitmi pomocí rotujících cívek s dutým vřetenem- tvorba ochranné bandáže. Cílem je ochrana nanovláknenného povlaku vůči poškození třením a zabránění slepování jednotlivých povlaků uvnitř návínů finálního výrobku.

- úprava výrobku teplem – volitelná – provádí se pouze ve speciálních případech
- navíjení.

Ukázky povrstvených nití bez ochranné nití (a, b) a s ochrannou nití bandáže (c, d) jsou na obrázku 8.



**Obr. 8:** Příklady povrstvených nití bez ochranné niti (a, b) a s ochrannou nití bandáže (c, d).

Z výše uvedeného vyplývá, že celý proces přípravy nanovlákný povrstvené niti podle popsaného postupu má několik uzlů, z nichž každý je charakterizován několika parametry. Vysoký celkový počet parametrů přípravy vyžaduje rozsáhlý výzkum jejich identifikace a vlivu. Na druhé straně činí technologii velice flexibilní a schopnou poskytnout mnoho specifických výrobků pro nejrůznější oblasti použití.

Na základě experimentů byly identifikovány parametry procesu a vymezeny intervaly jejich přijatelných hodnot. Parametry jsou rozděleny do následujících skupin:



Parametry nosné niti

- typ materiálu niti
- jemnost niti (tex)
- předená nit, multifilament hladký nebo tvarovaný
- elektrická vodivost niti daná:
  - typem nanášeného zvodivovacího roztoku
  - velikostí nánosu zvodivovacího roztoku
  - roztíráním zvodivovacího roztoku

Vedení niti ve zvlákňovací zóně

- vzájemná vzdálenost vodících válců
- úhel mimoběžnosti os vodících válců – rozteč ovinů niti
- způsob navedení niti na válce
- rychlost postupu niti

Elektrostatické zvlákňování

- parametry elektrostatického zvlákňování (typ polymeru, teplota, relativní vlhkost atd.)

Obtáčení ochrannou nití- ochranná bandáž

- typ obtáčecí niti
- počet obtáčecích nití
- stoupání šroubovice obtáčecí niti

Tepelná úprava povrstvené niti

- rychlost niti
- doba zdržení v ohřevné zóně
- rychlost a teplota ohřevného vzduchu.

## **2.5. Zhodnocení teoretických poznatků a cíle BP**

Z popsaných lineárních útvarů obsahujících nanovlákná a způsobů jejich výroby vyplývá, že útvary složené jen z nanovláken jsou cenově přijatelné pouze pro velmi speciální použití. Pro většinu předpokládaných použití se jeví výhodnější nanovlákný povrstvené nití.

Technologie jejich přípravy je popsána výše. Z textu vyplývá vysoký počet parametrů postupu.

Z toho důvodu je obsahem předložené práce průzkum vlivu vybraných parametrů procesu přípravy nanovlákný povrstvených nití na některé jejich důležité vlastnosti a také možnosti jejich testování.

## **3. Experimentální část**

### **3.1. Cíl**

Mají-li být lineární útvary povrstvené nanovlákný dále textilně zpracovány, musí vykazovat jistou odolnost proti poškození nanovláknenné vrstvy vlivem tření. Toto je základní podmínka pro zachování specifických vlastností nanovláken přítomných ve finálním výrobku. Odolnost samotného nanovláknenného povlaku je obecně velice nízká a závisí také na materiálu, ze kterého jsou nanovlákná vyrobena.

Ochranu povlaku před působením různých třecích elementů lze zajistit vhodným bandážováním. Toto bandážování rozdělí povrch povlaku na krátké úseky a mechanicky brání třecím elementům v proniknutí k nanovláknům. Zároveň ale vždy překrývá jistou část jejich povrchu, což může být nežádoucí. Vede také ke změně některých mechanických vlastností finálního lineárního útvaru. Zejména změna ohybové tuhosti se z hlediska dalšího zpracování jeví jako podstatná.

Cílem experimentální části této práce je lépe porozumět vztahům mezi výše uvedenými skutečnostmi a pro zvolený typický případ je také kvantifikovat, tak aby získané poznatky usnadnily návrh optimální struktury pro konkrétní aplikace lineárních útvarů pokrytých nanovlákný.

## 3.2. Plán experimentu

Pro experiment byl zvolen tento plán:

- 1) vyrobit poloprodukt-zvolenou nosnou nit pokrýt dvěma typy nanovláknenného povlaku tak, aby se lišily pouze druhem použitého polymeru
- 2) vyrobit finální lineární útvar-poloprodukt opatřit čtyřmi typy ochranné bandáže tak, aby se lišily pouze hodnotou stoupání šroubovic
- 3) pro takto vyrobené lineární útvary s nanovláknenným povlakem:
  - a) navrhnout metodu vhodnou ke stanovení míry poškození nanovláknenného povlaku třením
  - b) pomocí navržené metody stanovit míru poškození nanovláknenného povlaku třením v závislosti na hodnotě stoupání šroubovic ochranné bandáže
  - c) teoreticky stanovit plochu nanovláknenného povlaku zakrytého bandáží v závislosti na hodnotě stoupání jejich šroubovic
  - d) stanovit změnu ohybové tuhosti finálního lineárního útvaru v závislosti na hodnotě stoupání šroubovic ochranné bandáže.

## 3.3. Experiment

### 3.3.1. Výroba poloproduktu

K pokrytí nosné niti nanovláknny byla použita technologie podle PV2009-797 popsaná výše (2.4.2.)

#### NOSNÁ NIT

Jako nosná nit bylo zvoleno černé polyesterové (PL) hedvábí 167f36/1/3 tvarované nepravým zákrutem. Černá barva hedvábí usnadňuje pozdější identifikaci poškozených míst v nanovláknenném povlaku.

#### MATERIÁL NANOVLÁKEN

Pro výrobu nanovláken byly zvoleny tyto polymery: **polyuretan (PU)** od firmy Novotex s obchodním názvem Larithane LS 1086 (nyní změněný na Larithane AL 286), dodávaný jako 30 % roztok v N,N-dimethylformamidu (DMF) a **polyamid 6 (PA 6)** od firmy BASF s obchodním názvem Ultramid B 27, dodávaný v granulích.

Z těchto dvou polymerů byly připraveny zvlákňovací roztoky následujícího složení: 15,5 % roztok **PU** v DMF s přídavkem 0,5 % tetraethylamonium bromidu (TEAB) a 1 % vody, dále 12% roztok **PA 6** ve směsi koncentrované kyseliny octové a koncentrované kyseliny mravenčí v poměru 2:1.

#### ZVODIVĚNÍ NOSNÉ NITI

Zvodivění bylo provedeno nanesením zvodivovacího roztoku složení: demi voda, 3% CH<sub>3</sub>COONa, 1% neionogenní PAL Slovasol. Roztok byl nanášen hladkým rotujícím válcem  $n=100\text{ot/min}$ , o průměru 50mm z poloviny ponořeným v lázni a smyslem otáčení shodným se směrem postupu nosné niti. Následně byl roztok roztírán po povrchu niti během jejího průchodu mezi dvěma destičkami délky 100mm a s přitlakem 200g. Destičky jsou opatřeny povrchem z netkané textilie.

#### ZVLÁKŇOVÁNÍ

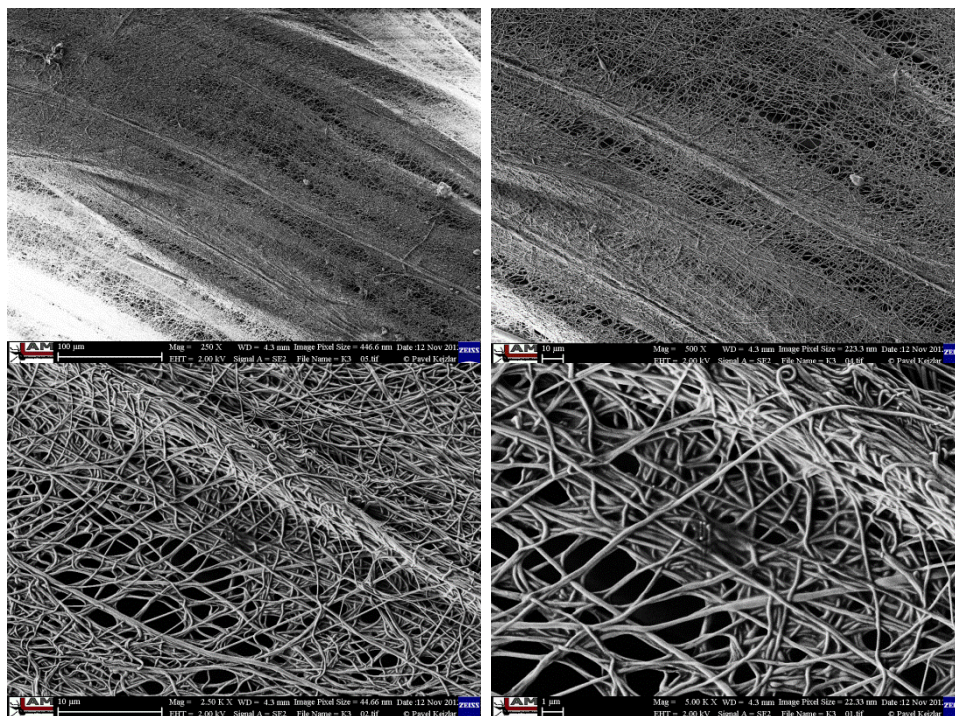
Zvodivená nosná nit byla navedena s roztečemi 5mm a v šířce 400mm na dvojici hnaných mimoběžných válců nacházejících se ve zvlákňovacím prostoru zařízení NANOSPIDER tak, aby mohla sloužit jako kolektor vznikajících nanovláken. Rychlost průchodu niti zařízením byla volena vzhledem k rozdílným zvlákňovacím výkonům zvolených polymerních roztoků tak, aby výsledná lineární hmotnost nanovláknenných povlaků byla shodná (viz. Tab. 1).

Materiál nanovláken	Zvlákňovací výkon [g/m min]	Zvlákňovací výkon válečku [g/0,3m min]	Rychlost niti [m/min]	Jemnost nanovláknenného povlaku [dtex]
PA 6	0,4	0,12	43,8	27,4
PU	0,55	0,165	60	27,4

**Tab. 1:** Zvlákňovací výkon a rychlosti průchodu niti zařízením NANOSPIDER.

Podmínky zvlákňování byly následující: délka zvlákňovací válcové elektrody 300 mm, vzdálenost zvlákňovací elektrody od nit'ové soustavy 150 mm, otáčky elektrody 2 ot/min, relativní vlhkost vzduchu v zařízení 20%, teplota vzduchu v zařízení 20 °C, množství klimatizovaného vzduchu procházejícího zařízením 100 m<sup>3</sup>/h.

Na obrázku 9 jsou SEM snímky PU nanovláknenného povlaku poloproduktu, povlak je zobrazen s postupně rostoucím zvětšením. Na prvním snímku s nejmenším zvětšením jsou pod nanovláknny patrná vlákna polyesterového hedvábí použitého jako nosné jádro.



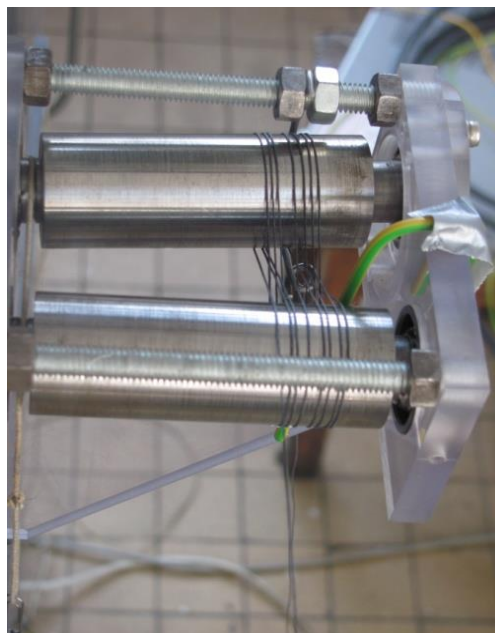
*Obr. 9: SEM snímky PU nanovláknenného povlaku.*

Poloprodukt byl ze zařízení odváděn pomocí vzduchové trysky a ukládán ve volných smyčkách do rotujícího koše, obdobně jako při- v textilu známém- tzv. ukládání do konve.

### 3.3.2. Výroba finálního lineárního útvaru

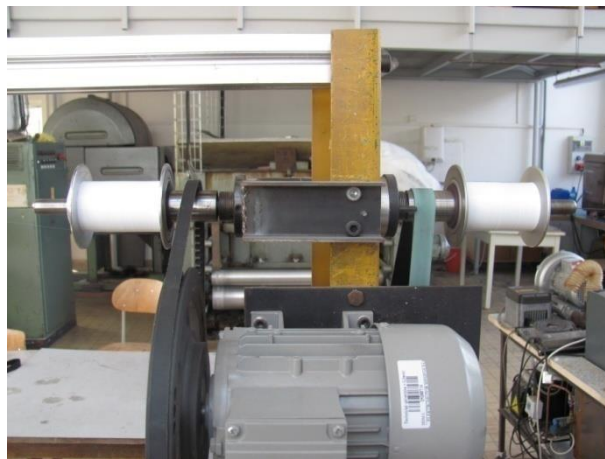
Poloprodukt byl opatřen čtyřmi typy ochranné bandáže. Ochranná bandáž vznikla ovnutím poloproduktu dvěma nitmi, ve dvou protichůdných šroubovicích a se vždy shodnou výškou stoupání pro daný typ bandáže. Pro jednotlivé typy bandáží byly zvoleny výšky stoupání šroubovic 0.5, 1, 1.5, a 2 mm. Tedy 2000, 1000, 666, a 500 ovinů na jeden metr poloproduktu. Jako ovíjecí nit bylo použito polyamidové monofilové hedvábí jemnosti 22 dtex. Obtáčení probíhalo níže popsaným způsobem.

Poloprodukt byl odebírán ze zásobního koše a veden v několika smyčkách přes pár mimoběžných válečků plnících úlohu brzdičky fungující bez namáhání poloproduktu třením (viz. Obr. 10).



**Obr. 10:** Vlevo zásobní koš s poloproductem, vpravo brzdící válečky.

Následoval průchod dvěma dutými vřeteny nesoucími cívky s ovíjecí nití (viz. Obr. 11). Vřetena se otáčela v opačných směrech konstantními otáčkami 16 860 ot/min.



**Obr. 11:** Ovíjecí vřetena.



Rozdílných hodnot výšek stoupání obtáčecích nití bylo pro jednotlivé vzorky dosaženo změnou rychlosti průchodu poloproduktu vřeteny. Konkrétní hodnoty rychlostí průchodu byly vypočteny podle vzorce

$$v = \frac{n}{o} , \quad (1)$$

kde  $v$  je rychlost průchodu vřeteny [m/min],  $n$  jsou otáčky vřeten [ot/min] a  $o$  je požadovaný počet ovinů na jeden metr [1/m]. Tyto hodnoty lze najít v následující tabulce 2.

Výška šroubovic ovinu [mm]	Počet ovinů [1/m]	Rychlost poloproduktu [m/min]
0,5	2000	8,4
1	1000	16,7
1,5	666	25,3
2	500	33,7

**Tab. 2:** Rychlosti průchodu poloproduktu ovíjecími vřeteny.

Výsledný lineární útvar byl navíjen na křížovou cívku, jak ukazuje obrázek 12.



**Obr. 12:** Navíjení výsledného lineárního útvaru.

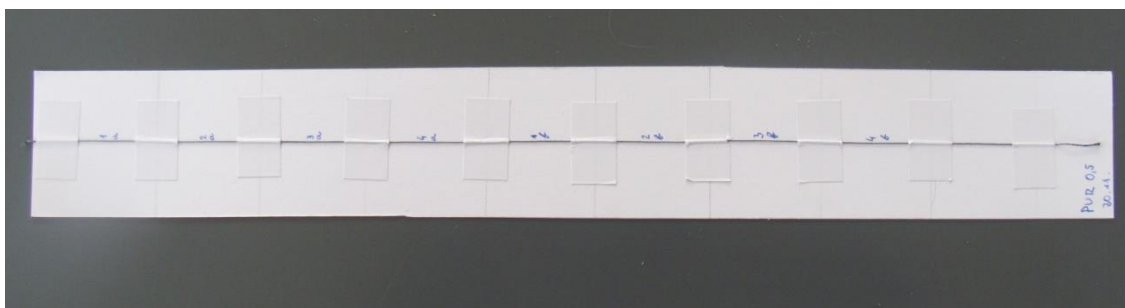
### 3.3.3. Návrh a popis metody stanovení míry poškození nanovláknenného povlaku třením

Pro určení míry poškození nanovláknenného povlaku třením byl navržen následující postup:

- modelově namáhat definovaný úsek lineárního útvaru třením
- vyhodnotit míru poškození nanovláknenného povlaku pomocí obrazové analýzy.

Chceme-li ke stanovení míry poškození využít obrazovou analýzu, je nutné zajistit, že analyzovaný úsek je právě ten, který byl vystaven namáhání třením. To znamená zajistit, že nedojde k pootočení lineárního útvaru kolem podélné osy ani při namáhání třecím elementem, ani při následné manipulaci se vzorkem. K tomuto účelu byla využita podložka z tuhého papíru, ke které se vzorek v určených roztečích fixuje pomocí proužků lepicí pásky. Mezi jednotlivými fixačními body je vzorek ponechán ve volném, pouze vhodně předepjatém stavu. Má-li tento volný úsek vhodnou délku, k pootočení nedochází. Délka úseku byla experimentálně stanovena na 20 mm. Předpětí vzorku před fixací bylo vyvozeno závažím o hmotnosti 10 g.

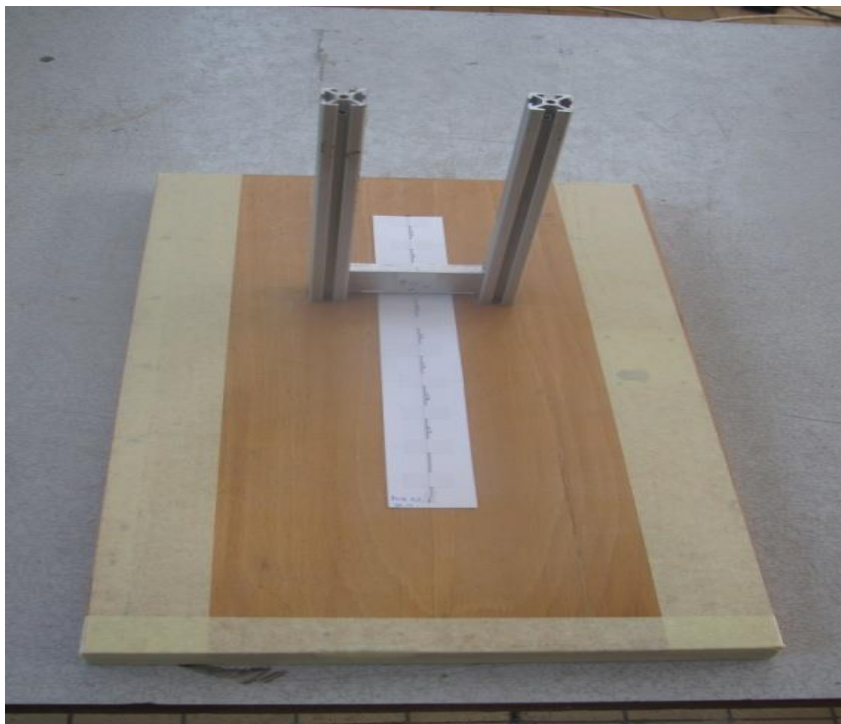
Takto připravený vzorek (viz. Obr. 13) lze jednou nebo opakovaně ručně protáhnout pod třecím elementem volitelné geometrie a s volitelným přtlakem vyvozeným pomocí závaží.



**Obr. 13:** Fixovaný vzorek připravený k protažení pod třecím elementem.

Za tímto účelem byl zkonstruován přípravek zobrazený na obrázku 14. Skládá se z vodorovné desky a dvou k ní kolmo připevněných vodících lišt, které brání třecímu elementu v pohybu v rovině desky, ale umožňují mu volný pohyb ve směru svislém.



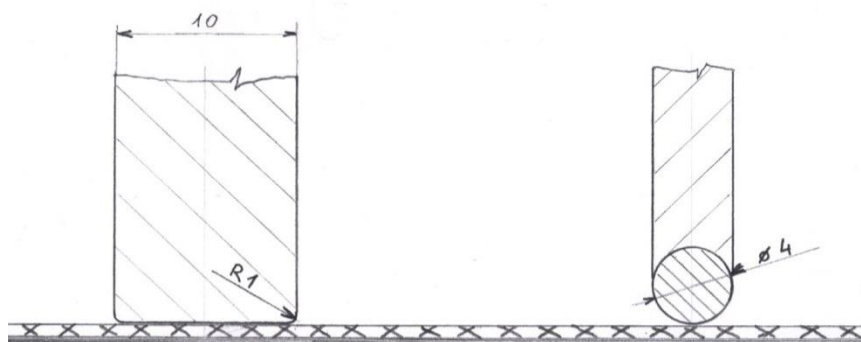


**Obr. 14:** Přípravek pro namáhání vzorku třením.

Dále byly navrženy dva třecí elementy s touto geometrií:

-hladká rovná plocha šířky 10 mm (viz. Obr. 15), materiál: ocel

-hladká válcová plocha průměru 4 mm (viz. Obr. 15), materiál: ocel



**Obr. 15:** Příčné řezy navrženými třecími elementy.

Přítlak obou třecích elementů byl použit konstantní, vyvozený celkovou hmotností 200g. Tato hodnota byla stanovena experimentálně. Vzorky byly vystaveny působení tření dvakrát. Tedy dvakrát protaženy pod týmž třecím elementem.

Následně byl každý jednotlivý úsek testovaného vzorku vyfotografován pomocí makroskopu s fotoaparátem. Konstantní zvětšení bylo zvoleno tak, aby výsledný obraz zachycoval úsek vzorku o skutečné délce 18 mm. Tento obraz byl dále zpracován pomocí softwaru obrazové analýzy Lucia G. Nejprve byla u každého jednotlivého obrazu změřena plocha celková, a následně plocha všech poškozených míst. Jako poškozená byla brána plocha zobrazující pouze čistý materiál jádra.

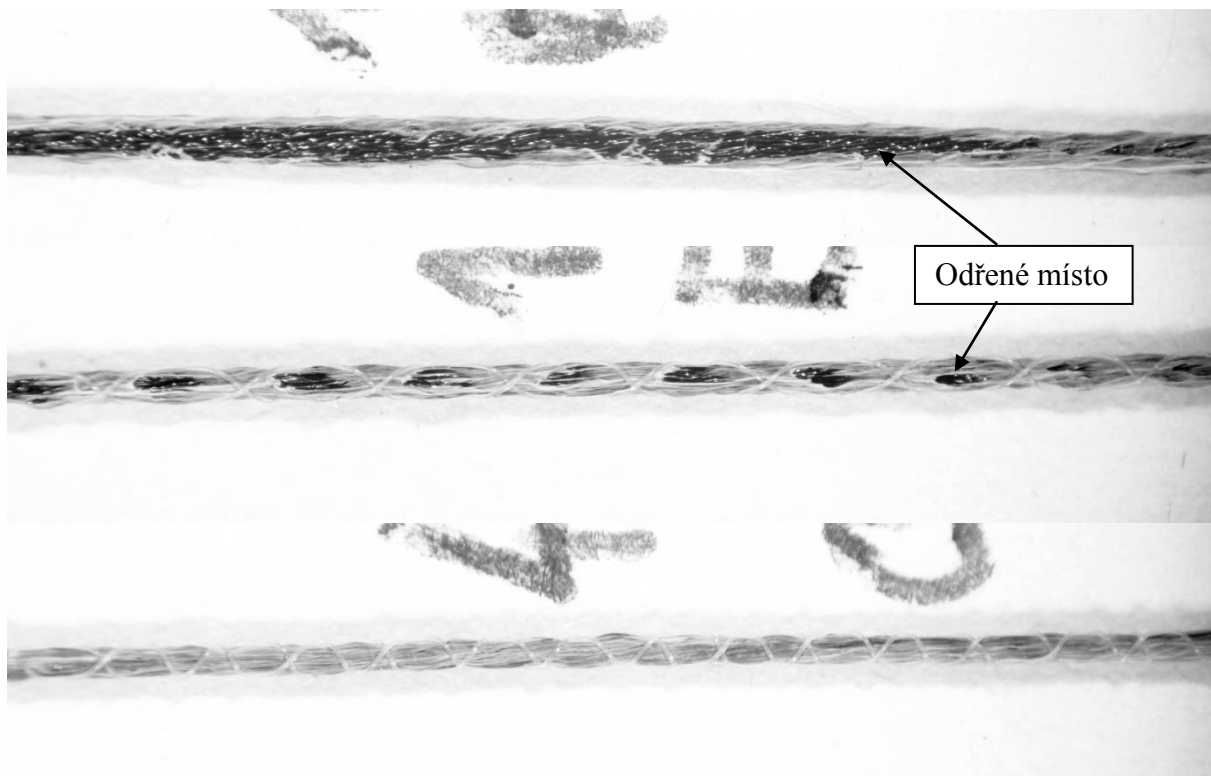
Míra poškození byla vyjádřena jako poměr součtu ploch poškozených ku ploše celkové. Tento poměr násobený stem udává míru poškození v %.

### **3.3.4. Stanovení míry poškození nanovláknenného povlaku třením**

Postupem navrženým a popsáním v kapitole 3.3.3. byla stanovena míra poškození nanovláknenného povlaku třením pro vzorky, jejichž označení lze najít v tabulce 3. Jak je patrné z této tabulky, do experimentu byly zahrnuty také vzorky poloproduktu bez ochranné bandáže.

Příklady vzhledu vzorků po namáhání třením jsou na obrázku 16. Jedná se o vzorky 1I, 1E a 3C. Tedy o vzorek bez ochranné bandáže na kterém je patrné značné poškození nanovláknenného povlaku v případě 1I, dále vzorek 1E s nižší mírou ochrany a patrným poškozením, a vzorek 3C s vyšší mírou ochrany téměř bez poškození.

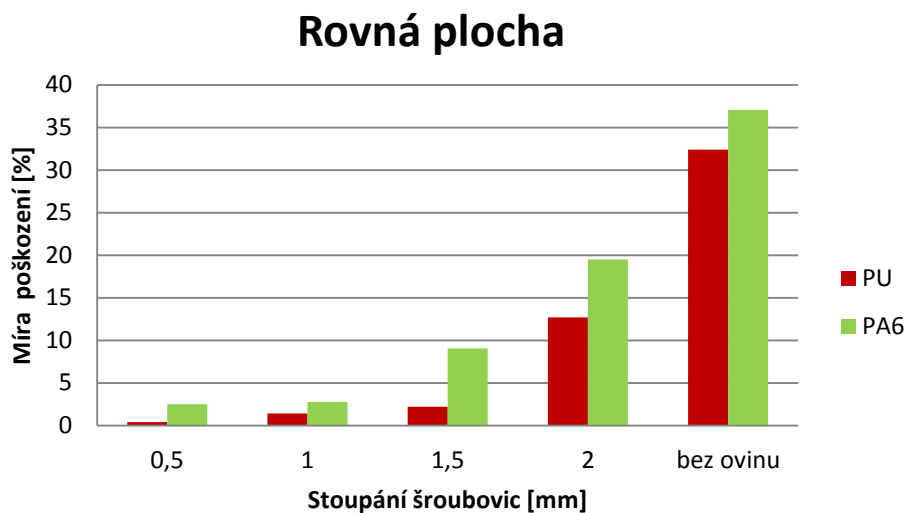
V této podobě byly vzorky dále hodnoceny obrazovou analýzou. U každého typu vzorku lineárního útvaru byly otestovány vždy čtyři úseky daným třecím elementem. Následně byla u každého jednotlivého úseku změřena plocha poškození a vyjádřena v procentech. Průměrné hodnoty těchto procent poškození jsou uvedeny v tabulce 3 a vyneseny v sloupcových grafech 1, 2, 3 a 4.



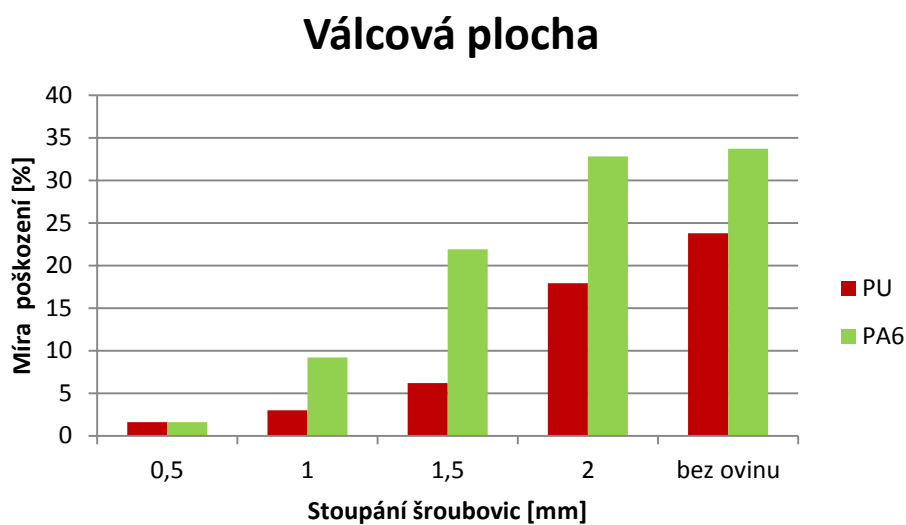
**Obr. 16:** Vzorky 1I, 1E a 4C s označením odřených míst.

Materiál nanovláken	Typ odíracího elementu	Typ ochranné bandáže- stoupání šroubovice [mm]				Bez bandáže
		0,5	1	1,5	2	
PU	Rovná plocha	1a-4a <b>0,4 %</b>	1c-4c <b>1,4 %</b>	1e-4e <b>2,2 %</b>	1g-4g <b>12,7 %</b>	1i-4i <b>32,4 %</b>
	Válcová plocha	1b-4b <b>1,6 %</b>	1d-4d <b>3,0 %</b>	1f-4f <b>6,2 %</b>	1h-4h <b>17,9 %</b>	1j-4j <b>23,8 %</b>
PA 6	Rovná plocha	1A-4A <b>2,5 %</b>	1C-4C <b>2,7 %</b>	1E-4E <b>9,0 %</b>	1G-4G <b>19,5 %</b>	1I-4I <b>37,0 %</b>
	Válcová plocha	1B-4B <b>1,6 %</b>	1D-4D <b>2,7 %</b>	1F-4F <b>21,9 %</b>	1H-4H <b>32,7 %</b>	1J-4J <b>33,7 %</b>

**Tab. 3:** Označení vzorků a průměrné hodnoty míry jejich poškození.



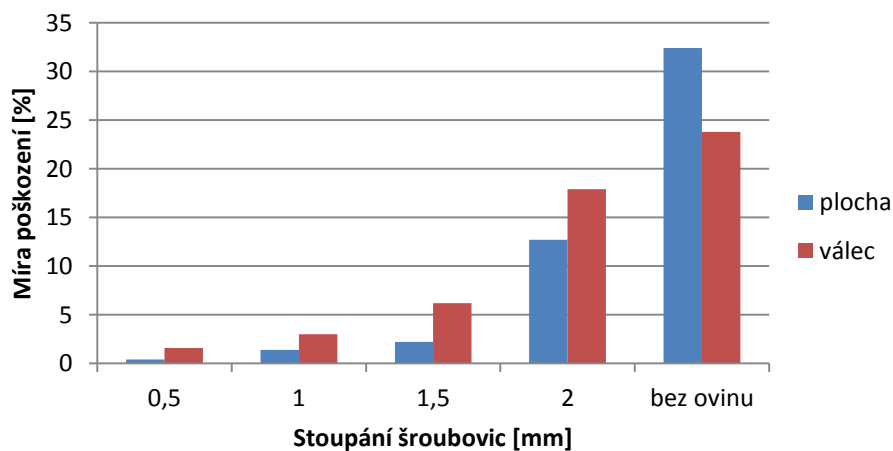
**Graf 1:** Míra poškození v závislosti na hodnotě stoupání šroubovic pro třecí element s rovnou plochou.



**Graf 2:** Míra poškození v závislosti na hodnotě stoupání šroubovic pro třecí element s válcovou plochou.

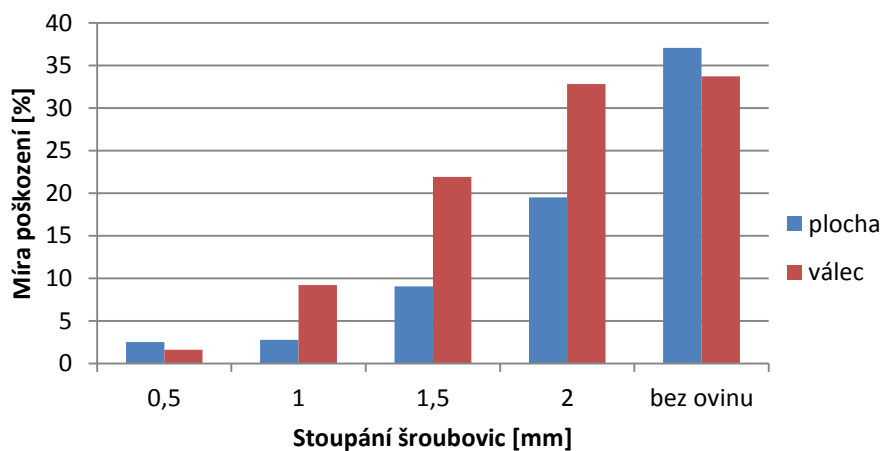
Z grafů 1 a 2 je patrné, že míra poškození PA 6 nanovláknenného povlaku je vždy vyšší než u povlaku z PU a to bez ohledu na typ třecího elementu nebo stoupání šroubovic ochranné bandáže. U obou materiálů roste míra poškození s hodnotou stoupání šroubovic a nejvyšších hodnot dosahuje u nechráněného poloproduktu (bez bandáže).

### PU



**Graf 3:** Porovnání míry poškození způsobeného třecím elementem s rovnou nebo válcovou plochou na PU nanovlákném povlaku.

### PA6

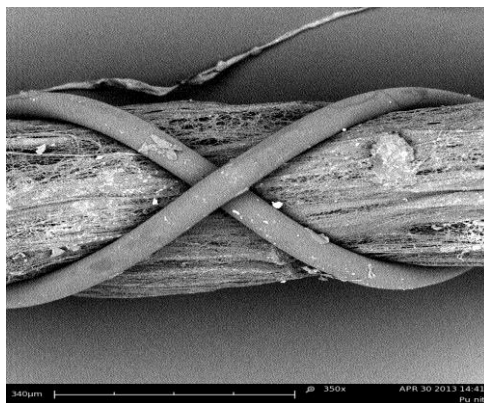


**Graf 4:** Porovnání míry poškození způsobeného třecím elementem s válcovou plochou na PA 6 nanovlákném povlaku.

Z grafů 3 a 4 lze vyčíst, že míra poškození nanovlákného povlaku je vyšší při působení třecím elementem s válcovou plochou, a to jak pro PA 6 tak PU nanovlákná. Pouze nanovlákný povlak poloproduktu byl v obou případech více poškozován třecím elementem plochým.

### 3.3.5. Teoretické stanovení plochy nanovláknenného povlaku zakrytého bandáží

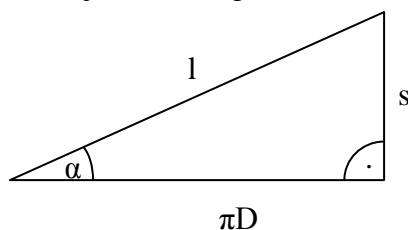
Pro praktické využití znalosti experimentálně stanovené hodnoty míry poškození resp. míry ochrany nanovláknenného povlaku v závislosti na stoupání šroubovic ochranné bandáže, je nutné znát také vliv samotné bandáže na velikost plochy volně přístupného nanovláknenného povlaku. Tedy znát plochu překrytou samotnými ovíjecími nitmi. K určení velikosti této plochy v závislosti na hodnotě stoupání šroubovic byl zvolen teoretický přístup. Situace je ilustrována na obrázku 17.



**Obr. 17:** SEM snímek jádra s nanovláknenným povlakem a křížícími se ovíjecími nitmi.

Výpočet vychází ze zjednodušené představy nosného jádra s nanovláknenným povlakem jako ideálního válce. Ovíjecí niti jsou popsány pouze jako průmět jejich styčné plochy s jádrem na plochu ovíjeného válce, bylo tedy zanedbáno reálné prostorové uspořádání a to zejména u jejich vzájemného křížení.

Výpočet délky ovíjecí niti  $\underline{L}$  na jednotku délky jádra vychází z charakteristického trojúhelníku šroubovice (viz. Obr. 18), kde  $\underline{s}$  je výška šroubovice (stoupání),  $\underline{D}$  je průměr jádra,  $\underline{l}$  je délka jednoho ovinu a  $\alpha$  je úhel stoupání šroubovice.



**Obr. 18:** Charakteristický trojúhelník šroubovice

Pak pro délku jednoho ovinu  $l$  platí

$$l = \sqrt{s^2 + (\pi D)^2}. \quad (2)$$

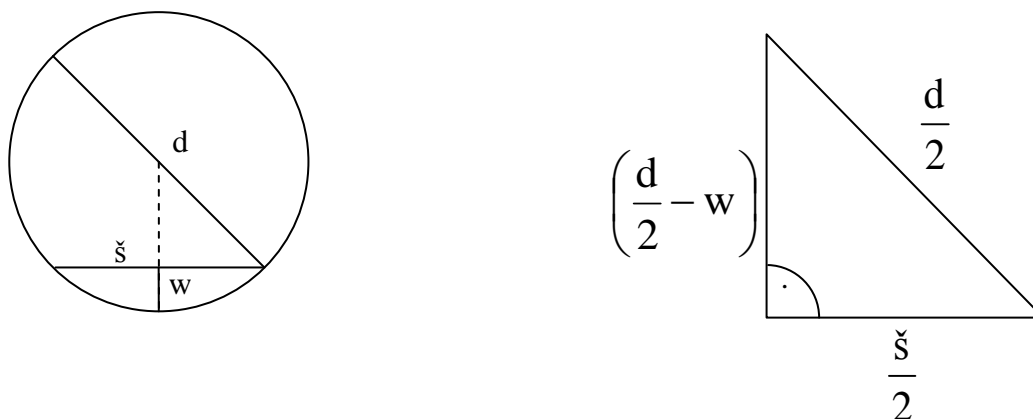
Následně pro  $L$  platí

$$L = \frac{\sqrt{s^2 + (\pi D)^2}}{s}. \quad (3)$$

A tedy délka  $L_2$  dvou ovíjecích nití, shodných parametrů je dána výrazem

$$L_2 = 2 \frac{\sqrt{s^2 + (\pi D)^2}}{s}. \quad (4)$$

Dále je třeba stanovit šířku průmětu  $\check{s}$  styku ovíjecí niti s jádrem. Do výpočtu je zaveden parametr  $w$ , který zachycuje míru vmáčknutí ovíjecí niti do povrchu jádra a tedy její vliv na šířku průmětu  $\check{s}$ . Je stanoven jako násobek poloměru průřezu  $d/2$ , viz. (6), přičemž násobek je vyjádřen pomocí čísla  $q$ , které může být v intervalu od 0 do 2. U použitého monofilového hedvábí se předpokládá kruhový průřez. Úvaha je zřejmá z obrázku 10, kde  $d$  je průměr ovíjecí niti,  $\check{s}$  je šířka průmětu a  $w$  je hloubka vmáčknutí.



**Obr. 19:** Ilustrace úvahy k rovnici (5).

Odtud plyne

$$\left(\frac{d}{2}\right)^2 = \left(\frac{\check{s}}{2}\right)^2 + \left(\frac{d}{2} - w\right)^2. \quad (5)$$

Dále vyjádříme  $w$  jako

$$w = q \frac{d}{2}, \quad (6)$$

kde  $q \in (0; 2)$ .

Po dosazení (6) do (5) a úpravě dostáváme pro  $\underline{s}$  rovnici

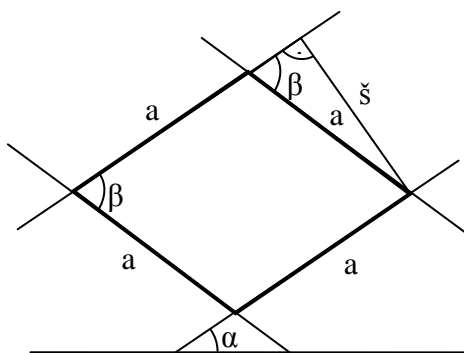
$$\underline{s} = d \sqrt{q(2-q)}. \quad (7)$$

Plochu  $\underline{S}_c$  překrytou na jednotce délky jádra dvěma shodnými ovíjecími nitmi, se shodným stoupáním, pouze opačným smyslem stoupání stanovíme jako součin délky ovinů  $\underline{L}_2$  a šířky jejich průmětu  $\underline{s}$ . Tedy

$$S_c = L_2 \underline{s}. \quad (8)$$

Velikost této plochy  $\underline{S}_c$  je nutné zmenšit o součet ploch zaujatých vzájemným křížením ovíjecích nití.

Velikost plochy  $\underline{S}_k$  jednoho křížení, v závislosti na hodnotě stoupání šroubovic, byla stanovena z plochy kosočtverce daného křížením průmětů  $\underline{s}$ , jak je patrné z obrázku 20, kde  $\underline{a}$  je strana kosočtverce,  $\underline{s}$  je šířka průmětu ovíjecí nití,  $\underline{\alpha}$  je úhel stoupání šroubovice a  $\underline{\beta}$  je úhel mezi sousedícími stranami kosočtverce.



**Obr. 20:** Znáznornění plochy jednoho křížení ovíjecích nití.

Plocha jednoho křížení  $\underline{S}_k$  je pak dána vztahem

$$S_k = a^2 \sin \beta. \quad (9)$$



Dále stranu kosočtverce  $\underline{a}$  vyjádříme jako

$$a = \frac{\check{s}}{\sin \beta}. \quad (10)$$

Úhel  $\underline{\beta}$  je možné vyjádřit jako

$$\beta = 2\alpha, \quad (11)$$

a úhel  $\underline{\alpha}$  je úhel stoupání v charakteristickém trojúhelníku šroubovice (viz. Obr. 18).

Pak platí, že

$$\sin \alpha = \frac{s}{l}. \quad (12)$$

Odtud dosazením (2) a po následné úpravě plyne, že

$$\alpha = \arcsin \frac{s}{\sqrt{s^2 + (\pi D)^2}}. \quad (13)$$

Dosazením (13) do (11) získáme pro úhel  $\underline{\beta}$  rovnici

$$\beta = 2 \arcsin \frac{s}{\sqrt{s^2 + (\pi D)^2}}. \quad (14)$$

Dále dosazením (14) do (9) a následným dosazením (10) získáme po úpravě výraz pro výpočet plochy jednoho křížení  $\underline{S}_k$

$$S_k = \frac{\check{s}^2}{\sin \left( 2 \arcsin \frac{s}{\sqrt{s^2 + (\pi D)^2}} \right)}. \quad (15)$$

Na jeden ovin dvou shodných, pouze protichůdných šroubovic připadají dvě plochy křížení. Můžeme tedy celkovou plochu křížení  $\underline{S}_{kc}$  na jednotku délky jádra vyjádřit jako

$$S_{kc} = \frac{2S_k}{s}. \quad (16)$$

Odečtením plochy  $\underline{S}_{kc}$  od plochy  $\underline{S}_c$  dostaneme plochu  $\underline{S}_{ov}$

$$S_{ov} = S_c - S_{kc}, \quad (17)$$

kde  $\underline{S}_{ov}$  je plocha, kterou zaujímá ochranná bandáž na povrchu jádra jednotkové délky.

Po dosazení rovnic (4), (8), (15) a (16) do rovnice (17) a následných úpravách dostaneme pro  $\underline{S}_{ov}$  výraz

$$S_{ov} = \frac{2\check{s}}{s} \left( \sqrt{s^2 + (\pi D)^2} - \frac{\check{s}}{\sin \left( 2 \arcsin \frac{s}{\sqrt{s^2 + (\pi D)^2}} \right)} \right). \quad (18)$$

Dáme-li do poměru plochu  $\underline{S}_{ov}$  ku ploše válcového jádra jednotkové délky  $\underline{S}_v$  a násobíme stem dostáváme procentuální vyjádření velikosti plochy pokryté bandáží z celkové plochy válcového jádra

$$S_{ov}[\%] = 100 \frac{S_{ov}}{S_v}, \quad (19)$$

kde

$$S_v = \pi D. \quad (20)$$

Dosazením (20) a (18) do (19) dostaneme pro  $\underline{S}_{ov} [\%]$

$$S_{ov}[\%] = \frac{\frac{200\check{s}}{s} \left( \sqrt{s^2 + (\pi D)^2} - \frac{\check{s}}{\sin \left( 2 \arcsin \frac{s}{\sqrt{s^2 + (\pi D)^2}} \right)} \right)}{\pi D}. \quad (21)$$

Dosazením (7) za  $\check{s}$  do (21) a drobnou úpravou výraz nabývá konečného tvaru

$$S_{ov}[\%] = \frac{200d\sqrt{q(2-q)} \left( \sqrt{s^2 + (\pi D)^2} - \frac{d\sqrt{q(2-q)}}{\sin \left( 2 \arcsin \frac{s}{\sqrt{s^2 + (\pi D)^2}} \right)} \right)}{\pi D s}. \quad (22)$$

Výraz (22) udává velikost plochy nanovláknenného povlaku jádra zakrytého ovíjecími nitmi ochranné bandáže v závislosti na hodnotě stoupání jejich šroubovic.

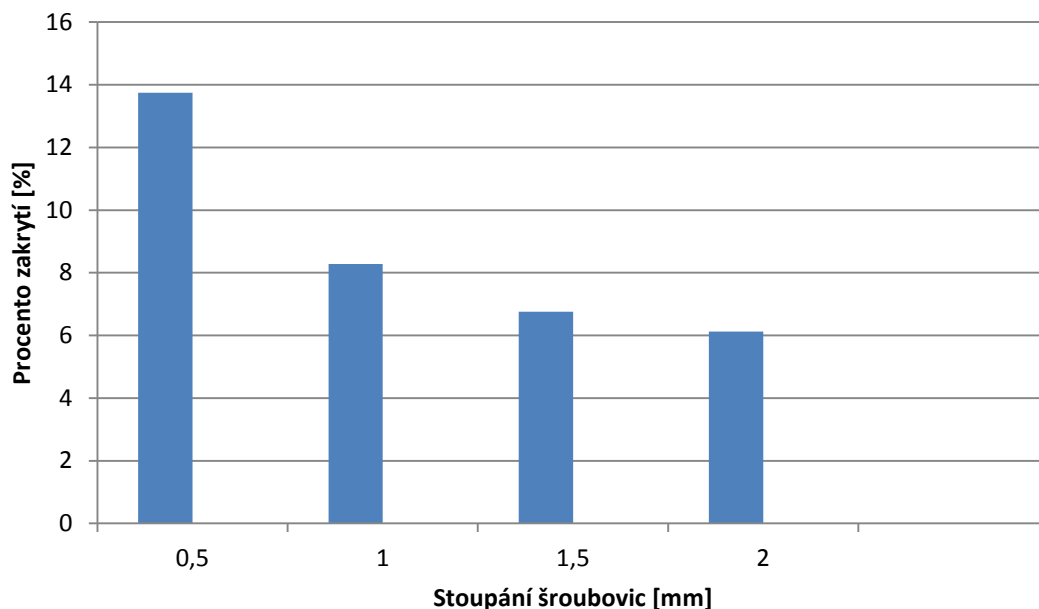
K výpočtu konkrétních hodnot  $\underline{S}_{ov}[\%]$ , příslušných k danému stoupání šroubovic  $\underline{s}$ , tedy postačuje znát následující dvě materiálové konstanty použitých nití:  $D$ -průměr jádra s nanovláknenným povlakem,  $d$ -průměr ovíjecí niti (monofilové hedvábí) a parametr  $q$ -udávající jakou částí poloměru je ovíjecí nit vmáčknuta do povrchu jádra.

V případě vzorků, které byly testovány a popsány v (3.3.3.) se jedná o tyto hodnoty:  $D=0,4$  mm,  $d=0,05$  mm,  $q=1/4$ . Hodnoty byly určeny z mikroskopických snímků vzorků. S použitím vztahu (22), byly pro tyto vzorky vypočteny hodnoty  $\underline{S}_{ov}[\%]$ , následující v tabulce 4 a znázorněné v grafu 5.

Stoupání šroubovic [mm]	Procento zakrytí nanovláknenného povlaku bandáží $\underline{S}_{ov}$ [%]
0,5	<b>13,742</b>
1	<b>8,281</b>
1,5	<b>6,754</b>
2	<b>6,125</b>

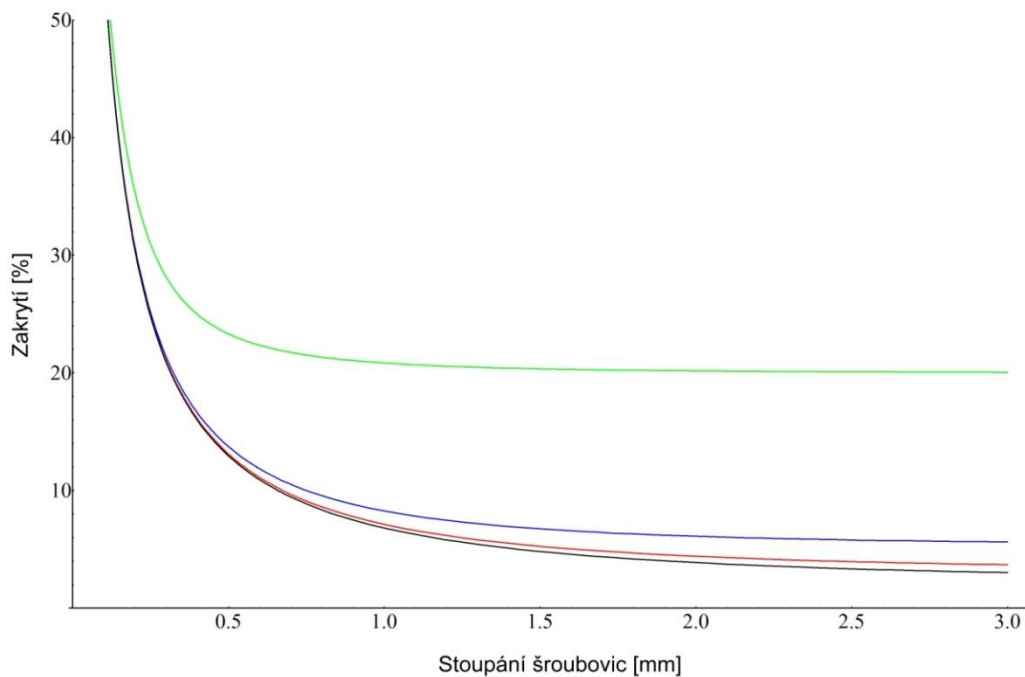
**Tab. 4:** Tabulka procent zakrytí nanovláknenného povlaku bandáží pro testovaná vzorky.

## Procenta zakrytí

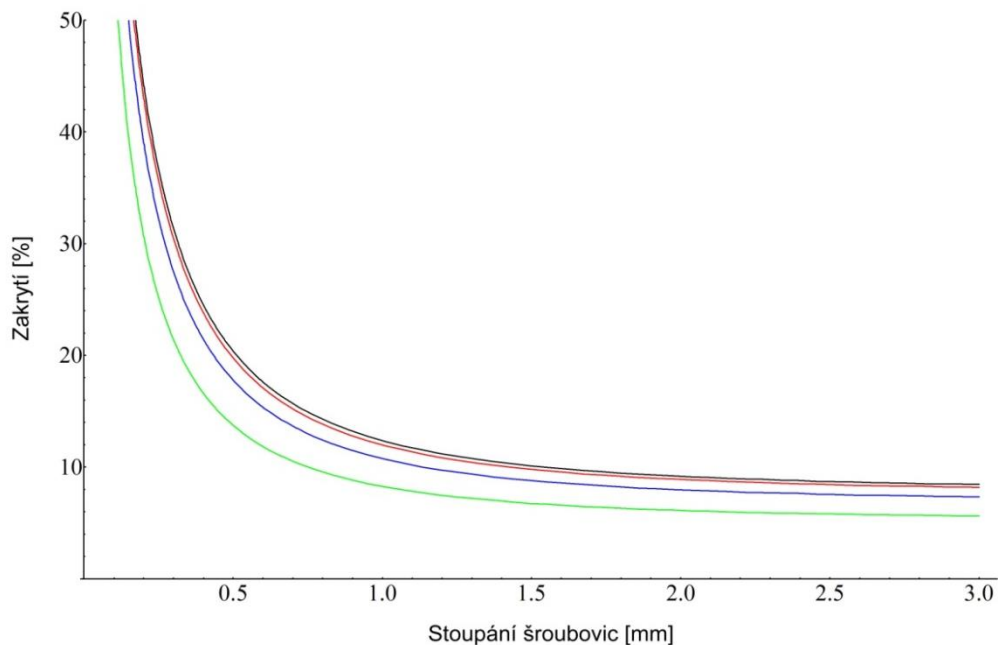


**Graf 5:** Procent zakrytí nanovláknenného povlaku bandáží pro testovaná vzorky.

Výraz (22) lze také využít k obecnějšímu porozumění problematice  $\underline{S}_{ov}[\%]$ . Například v grafech 6 a 7 jsou vyneseny hodnoty  $\underline{S}_{ov}[\%]$  v závislosti na stoupání šroubovic, vždy pro čtyři různé hodnoty vybrané konstanty. V případě grafu 6 se jedná o různé hodnoty průměrů nosného jádra s nanovláknem  $\underline{D}$ . Konkrétně byly zvoleny hodnoty průměrů 0.1, 0.4, 0.7 a 1 mm. V případě grafu 7 se jedná o různé hodnoty  $\underline{q}$  udávající jak velká část poloměru ovíjecí nitě je vmáčknuta do povrchu jádra s nanovláknenným povlakem. Konkrétně byly zvoleny hodnoty 1, 3/4, 1/2 a 1/4. Z grafů lze vyčíst trendy vývoje hodnoty  $\underline{S}_{ov}[\%]$  při změně těchto konstant, tedy při případné změně parametrů výchozích materiálů použitých k výrobě kompozitního lineárního útvaru s nanovláknenným povlakem.



**Graf 6:** Procento zakrytí nanovláknenného povlaku bandáží v závislosti na stoupání šroubovic pro různé průměry jádra  $D$  [mm],  $D=0,1$  (zelená),  $D=0,4$  (modrá),  $D=0,7$  (červená),  $D=1$  (černá),  $d=0,05$  [mm],  $q=1/4$ .



**Graf 7:** Procento zakrytí nanovláknenného povlaku bandáží v závislosti na stoupání šroubovic pro různou míru vmáčknutí ovíjecí nitě do povrchu jádra  $q$ ,  $q=1$  (černá),  $q=3/4$  (červená),  $q=1/2$  (modrá),  $q=1/4$  (zelená),  $D=0,4$  [mm],  $d=0,05$  [mm].

### 3.3.6. Stanovení změny ohybové tuhosti vlivem ochranné bandáže

U vzorků byla měřena ohybová délka  $\underline{C}$  (bending length) na zařízení podle normy EDANA – BENDING LENGHT 50.2-80 [17] (tzv. Cantilever test). Následně byla dle výše uvedené normy vypočtena ohybová tuhost  $G$  (flexural rigidity).

Ohybová délka  $\underline{C}$  se rovná polovině délky vysunutí  $\underline{l}$ . Délka vysunutí je délka vzorku, kterou je nutno vysunout přes hranu přístroje, aby se vysouvající konec vzorku dotkl roviny procházející touto hranou. Tato rovina svírá úhel  $41,5^\circ$  s vodorovnou základnou přístroje.

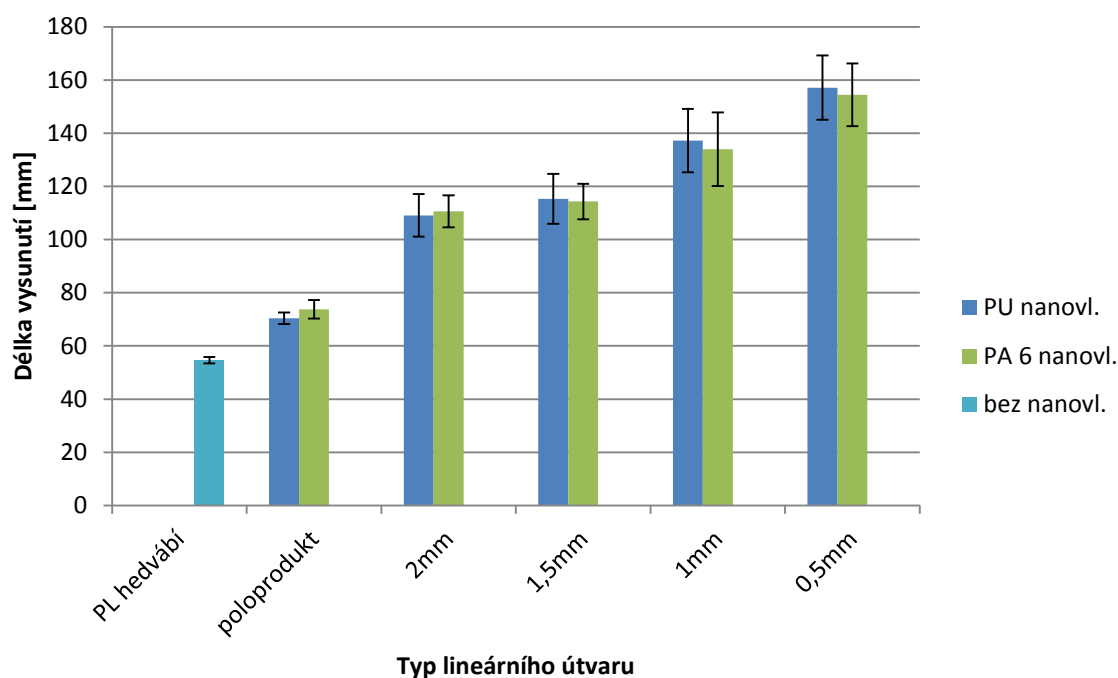
Tato metoda byla zvolena pro její jednoduchost a postačuje k zachycení trendu změny ohybové tuhosti lineárního útvaru s nanovlákným povlakem v závislosti na výšce šroubovic ochranné bandáže. Zároveň byly testovány oba typy poloproduktů a také čisté PL hedvábí - jádro.

Pro jednotlivé typy testovaných lineárních útvarů bylo provedeno vždy deset měření.

Výsledky a statistika těchto měření jsou uvedeny v tabulce 5 a znázorněny v grafu 8, včetně chybových úseček.

Typ lineárního útvaru		Průměrná vysunutá délka $\underline{l}$ [mm]	s [mm]	v [%]
Čisté PL hedvábí		54,6	1,20	2,2
PU	Poloprodukt bez bandáže	70,4	2,20	3,1
	2mm	109,1	8,02	7,3
	1,5mm	115,3	9,37	8,1
	1mm	137,2	11,96	8,7
	0,5mm	157,1	12,08	7,7
PA 6	Poloprodukt bez bandáže	73,8	3,49	4,7
	2mm	110,6	6,00	5,4
	1,5mm	114,3	6,66	5,8
	1mm	134	13,84	10,3
	0,5mm	154,4	11,08	7,6

**Tab. 5:** Průměrné délky vysunutí naměřené pro jednotlivé typy lineárních útvarů.



**Graf 8:** Průměrné délky vysunutí naměřené pro jednotlivé typy lineárních útvarů včetně chybových úsečků.

Ohybová tuhost  $\underline{G}$  [ $\text{mg} \cdot \text{m}^2$ ] byla z naměřených délek vysunutí vypočtena podle vztahu

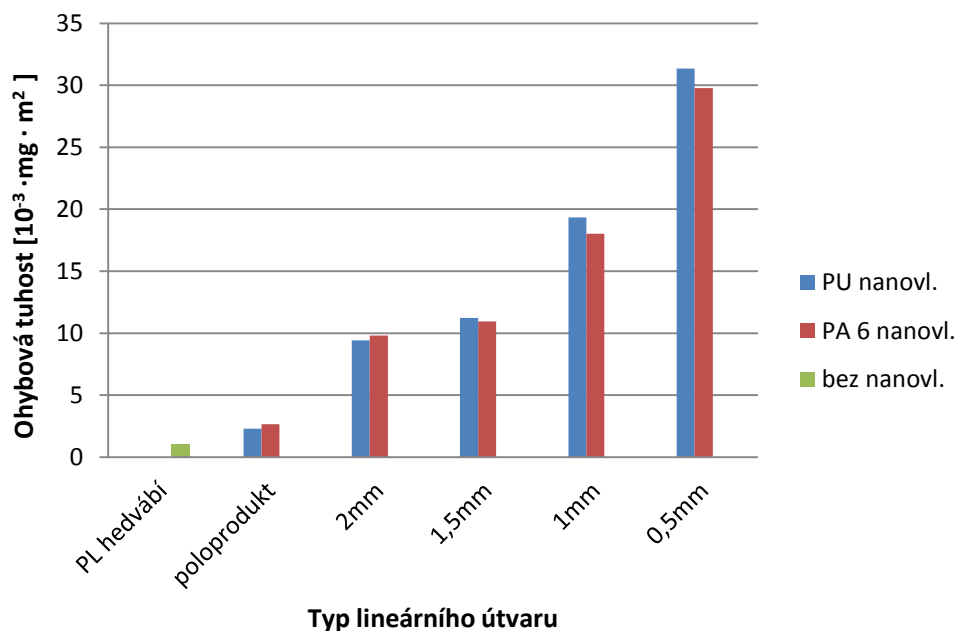
$$G = g \cdot (l/2)^3 \cdot 10^{-6}, \quad (23)$$

kde  $g$  je délková hmotnost [ $\text{g/m}$ ] a  $l$  je vysunutá délka [ $\text{mm}$ ].

Nejprve však bylo třeba pro každý typ lineárního útvaru stanovit jeho délkovou hmotnost, která se u jednotlivých typů lišila v závislosti na přítomnosti či nepřítomnosti ochranné bandáže. V případě její přítomnosti, pak záleží na její hustotě, tedy na délce ovíjecích nití připadajících na jednotku délky jádra. Délky ovíjecích nití pro jednotlivé typy vzorků byly vypočteny ze vztahu (4) a jejich hmotnost přičtena k hmotnosti poloproduktu. Výsledné délkové hmotnosti jsou uvedeny v tabulce 6. Zároveň jsou zde uvedeny vypočtené ohybové tuhosti a poměry ohybových tuhostí jednotlivých typů lineárních útvarů ku ohybové tuhosti čistého PL hedvábí. Graf 7 znázorňuje hodnoty ohybových tuhostí jednotlivých lineárních útvarů.

Typ lineárního útvaru		Délková hmotnost [dtex]	Délková hmotnost [g/m]	Ohybová tuhost G [mg·m <sup>2</sup> ]	Poměr $\frac{G}{1,019 \cdot 10^{-3}}$
Čisté PL hedvábí		501	0,0501	$1,019 \cdot 10^{-3}$	1
PU	Poloprodukt bez bandáže	528	0,0528	$2,303 \cdot 10^{-3}$	2,3
	2mm	580	0,0580	$9,415 \cdot 10^{-3}$	9,2
	1,5mm	586	0,0586	$11,228 \cdot 10^{-3}$	11,0
	1mm	599	0,0599	$19,337 \cdot 10^{-3}$	19,0
	0,5mm	647	0,0647	$31,358 \cdot 10^{-3}$	30,8
PA 6	Poloprodukt bez bandáže	528	0,0528	$2,653 \cdot 10^{-3}$	2,6
	2mm	580	0,0580	$9,808 \cdot 10^{-3}$	9,5
	1,5mm	586	0,0586	$10,938 \cdot 10^{-3}$	10,7
	1mm	599	0,0599	$18,016 \cdot 10^{-3}$	17,7
	0,5mm	647	0,0647	$29,768 \cdot 10^{-3}$	29,2

**Tab. 6:** Tabulka hodnot délkových hmotností a ohybových tuhostí jednotlivých lineárních útvarů a také jejich poměrů ku tuhosti čistého PL hedvábí – udává kolikrát je daný útvar tužší než výchozí jádro.



**Graf 9:** Ohybové tuhosti jednotlivých typů lineárních útvarů.



## 4. Diskuse výsledků

Má-li být posouzena vypovídající schopnost metody navržené ke stanovení míry poškození nanovláknenného povlaku, je vhodné experimentálně získané výsledky (uvedené v kapitole 3.3.4.) konfrontovat s některými předpoklady či známými fakty.

Lze předpokládat, že se stoupající hustotou ovinů ochranné bandáže poroste míra ochrany nanovláknenného povlaku. Tento předpoklad metoda potvrdila.

Je známo, že PU nanovláknna jsou houževnatější (odolnější) než nanovláknna vyrobená z PA 6. Tento fakt dokázala metoda postihnout.

Lze předpokládat, že válcová třecí plocha snadněji pronikne mezi jednotlivé oviny ochranné bandáže a bude tedy nanovláknenný povlak poškozovat účinněji než třecí plocha rovná, klouzající po povrchu ovinů. Tento předpoklad (vliv tvaru třecího elementu) metoda potvrdila.

Z výše uvedeného je možné usoudit, že navržená metoda skutečně dokáže postihnout jak změny parametrů testovaných vzorků, tak i změny parametrů procesu tření. Je tedy možné ji dále rozvíjet směrem k většímu přiblížení reálným technologiím a procesům připadajícím v úvahu pro zpracování lineárních útvarů s nanovláknenným povlakem. Můžeme volit zejména parametry ovlivňující proces tření, a to:

- geometrii třecího elementu
- materiál třecího elementu
- kvalitu povrchu třecího elementu
- přítlak třecího elementu
- rychlost průchodu vzorku pod třecím elementem
- počet průchodů vzorku pod třecím elementem

tak, aby se proces tření, co nejvíce přiblížil skutečnému namáhání lineárního útvaru během zpracování uvažovanou technologií.

Mají-li být experimentálně zjištěné údaje o míře poškození vzorků třením dány do vztahu s vypočtenými hodnotami ploch zakrytých ochrannou bandáží, a následně navržena optimální konstrukce lineárního útvaru, je vhodné provést vyhodnocení tzv. aktivní nanovláknenné plochy, tj. plochy nanovláknenného obalu, která není poškozena ani zakryta ochrannou bandáží. Toto vyhodnocení lze provést níže uvedeným způsobem.

Pro daný typ lineárního útvaru sečteme procenta plochy poškozené a procenta plochy zakryté ochrannou bandáží. Odečteme-li tuto hodnotu od 100%, dostaneme hodnotu

velikosti aktivní plochy nanovláknenného povlaku v %. Tyto hodnoty pro posuzované vzorky jsou uvedeny v následující tabulce 7.

Materiál nanovláken	Typ odíracího elementu	Typ ochranné bandáže- stoupání šroubovice [mm]				Bez bandáže
		0,5	1	1,5	2	
PU	Rovná plocha	1a-4a 85,86 %	1c-4c 90,32 %	1e-4e <b><u>91,05 %</u></b>	1g-4g 81,17 %	1i-4i 67,60 %
	Válcová plocha	1b-4b 84,66 %	1d-4d <b><u>88,72 %</u></b>	1f-4f 87,05 %	1h-4h 75,97 %	1j-4j 76,20 %
PA 6	Rovná plocha	1A-4A 83,76 %	1C-4C <b><u>89,02 %</u></b>	1E-4E 84,25 %	1G-4G 74,37 %	1I-4I 63,00 %
	Válcová plocha	1B-4B <b><u>84,66 %</u></b>	1D-4D 82,52 %	1F-4F 71,35 %	1H-4H 61,17 %	1J-4J 66,30 %

**Tab. 7 :** Tabulka hodnot velikosti aktivního nanovláknenného povlaku.

Z tabulky 7 je možné vyčíst optimální hodnoty stoupání šroubovic ochranné bandáže pro každý typ lineárního útvaru a třecí element (u zvýrazněných hodnot), a to z hlediska maximální velikosti aktivní plochy nanovláknenného povlaku. Ovšem, vezmeme-li v úvahu například malé rozdíly hodnot u PU nanovláken při stoupání šroubovic 1 a 1,5 mm, a přihlédneme-li k ekonomice výroby, tedy např. k výrobní rychlosti a spotřebě ovíjecího materiálu, je možné, že optimální hodnota bude poněkud jiná, než ta vyplývající z tabulky. Je však jisté, že údaje uvedené v tabulce mohou sloužit jako dobrý základ pro takovéto rozhodování o optimálních parametrech ochranné bandáže.

Také je možné si povšimnout, že bandáž se stoupáním 0,5 mm se již nachází v oblasti rychlého růstu hodnot  $S_{ov}$  [%] v závislosti na zmenšování výšky stoupání šroubovic (viz. str. 38, graf 7), a přestože poskytuje vysokou míru ochrany, bylo by možné ji doporučit pouze pro ochranu choulostivějších nanovláknenných povlaků (např. z PA 6) a/nebo pro agresivněji působící třecí elementy.

Zhodnotíme-li vliv stoupání šroubovic ochranné bandáže na velikost aktivní plochy nanovláknenného povlaku celkově, pak poněkud překvapivě zjistíme, že tento vliv je poměrně malý (zejména u stoupání 0,5, 1, 1,5 mm). Jedná se o jednotky procent. Je to dáno zjevně tím, že i když se stoupající hustotou ovinů roste i míra ochrany, je zde přítomný také protichůdný efekt vzrůstající plochy povrchu zakrytého samotnou bandáží.

Dalším faktorem ovlivňujícím volbu optimální konstrukce lineárního útvaru s nanovláknenným povlakem je jeho ohybová tuhost. Jak bylo prokázáno měřením v kapitole 3.3.6. je ohybová tuhost finálního lineárního útvaru silně ovlivněna přítomností ochranné bandáže, přičemž pro vyšší hustoty ovinů je nárůst ohybové tuhosti strmější (viz. str. 41, graf 9). Z provedených měření dále vyplývá, že ohybová tuhost finálního lineárního útvaru může dosahovat až třicetinasobku hodnoty tuhosti výchozího jádra v případě použití bandáže se stoupáním šroubovic 0,5 mm.

## 5. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo prostudovat dosavadní výsledky vývoje textilních lineárních útvarů obsahujících nanovláknna a následně je zhodnotit, popsat technologie a zařízení určená k výrobě těchto útvarů, dále pak průzkum vlivu vybraných parametrů procesu přípravy nanovláknny povrstvených nití na některé jejich důležité vlastnosti a možností jejich testování.

V teoretické části práce byla první část cíle naplněna rozebráním problematiky výroby nití vytvořené pouze z nanovláken a pak nití kompozitní, tvořené nosným jádrem s nanovláknenným povlakem. Byly zhodnoceny výhody a nevýhody, které příslušná výroba a výrobky přináší. Dále pak byl kladen důraz zejména na popis vývoje technologie pokrytí nosné nití nanovláknenným povlakem. Byly identifikovány, jak parametry samotného pokrývání nosné nití nanovláknny, tak i parametry celého technologického procesu výroby lineárního útvaru pokrytého nanovláknny, které ovlivňují také jeho konečné vlastnosti.

Druhá část cíle byla splněna v experimentální části práce, která se věnuje problematice ochrany nanovláknenného povlaku před poškozením vlivem tření. Porozumět této problematice je důležitá zejména z hlediska možnosti následného zpracování lineárního útvaru s nanovláknenným povlakem do podoby plošné textilie nebo 3D útvaru při zachování maximální velikosti volně přístupné aktivní plochy nanovláknenného povlaku. Ochrana nanovláknenného povlaku je realizována pomocí ochranné bandáže, která v závislosti na

jejích parametrech vykazuje větší nebo menší míru ochrany nanovláken a zároveň ovlivňuje další vlastnosti finálního lineárního útvaru. Protože se v případě těchto útvarů jedná o zcela nový materiál, byla navržena metoda a zařízení umožňující testování míry ochrany, kterou bandáž poskytuje. Tato metoda spočívá v modelovém namáhání nanovláknenného povlaku třením a následném vyhodnocení míry poškození pomocí obrazové analýzy. Byly identifikovány parametry modelového namáhání, které lze volit tak, aby se blížilo reálnému namáhání niti během zpracování (např. tkaní, pletení). Podle výše uvedeného návrhu bylo sestrojeno testovací zařízení a vyrobeny dva typy třecích elementů (rovná a válcová plocha). Dále bylo vyrobeno dostatečné množství vzorků nítí pokrytých nanovláknem. Jednotlivé typy vzorků se lišily pouze použitým polymerem nanovláken (PU, PA 6) a parametry ochranné bandáže. Jako proměnný parametr ochranné bandáže byla zvolena její hustota, tedy výška stoupání jejích šroubovic. Tyto vzorky byly testovány s pomocí výše zmíněné metody a zařízení. Výsledky testování potvrdily teoretické předpoklady a prokázaly tak vypovídací schopnost navržené metody. Výsledky testů byly dále využity jako podklad k hledání optimálních parametrů ochranné bandáže. Nejprve však bylo nutné stanovit velikost plochy nanovláknenného povlaku zakrytého samotnou bandáží v závislosti na její hustotě. K řešení tohoto problému byl zvolen teoretický přístup, a byl odvozen matematický vztah, který tuto závislost popisuje. Poté byl navržen postup, jak experimentálně zjištěné údaje o míře poškození vzorků třením a vypočtené hodnoty velikosti ploch zakrytých bandáží použít ke stanovení optimálních parametrů ochranné bandáže. Použití tohoto postupu ukázalo cestu k optimalizaci procesu výroby a konstrukce finálního lineárního útvaru s nanovláknenným povlakem.

Pro doplnění znalostí vlivu ochranné bandáže na vlastnosti finálního lineárního útvaru byla u vyrobených vzorků proměřena jejich ohybová tuhost. Výsledkem provedených měření je zjištění, že přítomnost ochranné bandáže silně ovlivňuje výslednou ohybovou tuhost, a to tak, že hodnota ohybové tuhosti stoupá s rostoucí hustotou ovinů ochranné bandáže. Z výsledků rovněž vyplývá, že změna ohybové tuhosti finálního lineárního útvaru způsobená přítomností ochranné bandáže bude muset být brána v úvahu při určování optimálních parametrů této bandáže.

Dalším možným pokračováním práce by bylo detailněji rozpracovat použité testovací metody. Na straně materiálových parametrů lineárního útvaru, by pak mohlo přinést zajímavé výsledky například testování účinnosti ochranné bandáže v závislosti na změně průměru (jemnosti) ochranné ovíjecí niti.

Je třeba napsat, že tato práce je první, která se touto problematikou zabývá a přináší mnoho nových poznatků, jak ke zmíněné technologii, tak k vlastnímu použití vyrobených materiálů.

## 6. Seznam použité literatury

- [1] RAMAKRISHNA, S., FUJIHARA, K., TEO, W., LIM, T. and MA, Z. An introduction to electrospinning and nanofibres. Singapore: World Scientific Publishing Co., 2005. ISBN 981-256-415-2.
- [2] ANTHONY, L.A. Science and Technology of Polymer Nanofibers. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2008. ISBN 978-0-471-79059-4.
- [3] FILATOV, Y., BUDYKA, A., KIRICHENKO, V. Electrospinning of Micro- and Nanofibers. Connecticut: Begell House, Inc., 2007. ISBN 978-1-56700-241-6.
- [4] TUL. Způsob výroby nanovláken z polymerního roztoku elektrostatickým zvlákňováním a zařízení k provádění způsobu. JIRSÁK, O., SANETRŇÍK, F., LUKÁŠ, D., KOTEK, V., MARTINOVÁ, L., CHALOUPEK, J. CZP 294274. 2004-11-10. [ také EP 1673493(A1). 2006-06-28]
- [5] NIU, H., LIN, T. Fiber Generators in Needleless Electrospinning. Journal of Nanomaterials, 2012, s. 13. DOI10.1150/2012/725950. ISSN1687-4110.
- [6] NIU, H., WANG, X., LIN, T. Needleless electrospinning: influence of fibre generator geometry. Journal of textile institute, 2012, vol. 103, is. 7, p. 787-794. DOI 10.1080/00405000.2011.608494. ISSN0040-5000.
- [7] KIM, H., PARK, J. A process of preparing continuous filament composed of nanofibers. KIM, H., PARK, J. WO 2006-052039(A1). 2006-05-18.
- [8] KIM, H. Process of preparing continuous filament composed of nanofibers. KIM, H. US 2009-189319(A1). 2009-07-30.
- [9] NEUVEDENO. Preparation method of composite yarn including nanofibres. NEUVEDENO. KR 2011-0047340(A). 2011-05-09.

- [10] ALI, U., ZHOU, Y., WANG, X., LIN, T. Direct electrospinning of highly twisted, continuous nanofiber yarns. Journal of textile institute, 2012, vol. 103, is. 1, p. 80-88.DOI: 10.1080/004050000.2011.552254. ISSN0040-5000.
- [11] COMMONWEALTH SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL RESEARCH ORGANISATION. Nanofibre yarn. ATKINSON, K.R., FINN, N. US 2010-126134(A1). 2010-05-25.
- [12] PANASONIC CORP., TOKYO INST. TECH. Method for doubling nanofiber, and apparatus therefor. TAKAHASHI, M., TANIOKA, A. JP 2010-053457(A). 2008-08-26.
- [13] ELMARCO s.r.o. Lineární nanovláknenný útvar obsahující nanovlákná, způsob výroby a zařízení k výrobě takového útvaru. JIRSÁK, O., SANETRŇÍK, F., CHALOUPEK, J., MAREŠ, L., NOVÁK, O. CZ 2007-0179. 2008-09-08.  
[také WO 2008-106904(A1). 2008-09-12.]
- [14] ELMARCO s.r.o. Lineární útvary obsahující nanovlákná a způsob a zařízení pro jeho výrobu. JIRSÁK, O., SANETRŇÍK, F., MAREŠ, L. CZ 2009-797. 2011-06-08.[také EP 2504471(A1). 2012-10-03.]
- [15] JIRSÁK, O., SANETRŇÍK, F. A KOL. Nanovlákná a jejich kompozity pro technické a biomedicínské aplikace. Liberec: TUL, 2006. Zpráva k projektu MPO 1H-PK2/46.
- [16] JIRSÁK, O., SANETRŇÍK, F., CHALOUPEK, J. Nanofiber-covered yarns. Chemical Fibers International, 2011, vol. 61, 2, s. 84-86. and Melliand China, 2012, vol. 2, s. 7-10. ISSN1007-6867.
- [17] EDANA 50.2-80. Bending length. Brusel:Edena. 2012